

高压脉冲电场技术在食品质量与安全中的应用进展

冯叙桥^{1,2}, 王月华¹, 徐方旭¹

(1. 沈阳农业大学 食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 渤海大学 食品科学研究院/辽宁省食品安全重点实验室, 辽宁 锦州 121013)

摘要: 高压脉冲电场技术作为国际上最先进的非热加工技术之一,以其良好的应用特性如能耗低、省时、处理温度低、效率高和对食品原有品质保存效果好等特点,吸引了国内外广大研究者的关注。与其它食品加工技术相比,高压脉冲电场技术不仅具有更好的杀菌、钝酶效果,还能有效降解残留农药,减少食品添加剂的使用,而且基本不影响食品的原有品质和营养特性。因此,将高压脉冲电场技术有效应用于食品工业中,可大大提高食品质量与食品安全性,为食品行业的发展开辟新途径。作者介绍了高压脉冲电场的处理装置、加工机理以及在食品质量与安全中的应用途径,并对高压脉冲电场技术的应用前景进行了展望。

关键词: 高压脉冲电场;食品质量;食品安全

中图分类号: TS 205.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2013)04—0337—10

Advances on Application of High Voltage Pulsed Electric Field in Food Quality and Safety

FENG Xu-qiao^{1,2}, WANG Yue-hua¹, XU Fang-xu¹

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Food Science Research Institute of Bohai University, Food Safety Key Lab of Liaoning Province, Jinzhou 121013, China)

Abstract: As one of the most advanced athermal treatment technologies, high voltage pulsed electric field (HPEF) technology has attracted the attention of the researchers in the world with its good application properties, such as low energy consumption, time saving, low treatment temperature, high efficiency and good preservation effect for the quality of original food. Compared with other processing technologies, HPEF technology not only shows better effect of sterilization and of blunting enzymes, but also degrades pesticide residues effectively, decreases additives use, and hardly affects the original quality and nutritional characteristics of the treated food. Therefore, application of HPEF technology in food industry will greatly improve food quality and safety, and provide a new way for the development of food industry. Processing device, treatment mechanisms of HPEF technology and its possible application ways for food quality and safety control have been introduced in this review, and its advances on application in food quality and safety envisaged.

收稿日期: 2013-02-14

基金项目: 辽宁省科技厅重点项目(2008205001); 沈阳农业大学高端人才引进基金项目(SYAU20090107); 渤海大学人才引进基金项目(BHU20120301)。

作者简介: 冯叙桥(1961—),男,河北曲阳人,教授,博士研究生导师,主要从事食品质量与安全研究。E-mail: feng_xq@hotmail.com

Keywords: HPEF, food quality, food safety

目前,食品工业中采用的传统加工技术如蒸煮、巴氏杀菌、腌制、微波等对食品的组织结构、感官性状和营养成分有很大的破坏性,使食品原有的品质和营养价值损失较大。随着人们消费观的变化,利用这些加工技术生产出的食品已越来越不能满足消费者的要求。高压脉冲电场(High voltage pulsed electric field, HPEF)技术是一种在国际上新兴的食品绿色冷加工技术,正处在由中间试验向商业化过度阶段。超高压的处理范围只对生物高分子物质立体结构中非共价键的结合产生影响,对食品的维生素等营养物质和风味物质基本没有影响,较大限度的保存了食品的天然性质,因此, HPEF 技术在众多非热加工技术中脱颖而出。与传统的加热加工技术相比, HPEF 技术具有处理能耗低、时间短、无污染、操作简便、能更好地保持原有食品的品质和营养等优点^[1],使其在提高食品质量与安全的应用中具有不可替代的作用,是当前最具有潜力实现工业化的冷杀菌技术。与其他非热加工技术相比, HPEF 技术能耗低、杀菌彻底、能够更好地保持食品质量、降低食品安全隐患。若将高压脉冲电场技术有效地应用于食品工业中,将有效促进食品行业的发展,带来巨大的经济效益和社会效益。20 世纪 60 年代,美国最早将 HPEF 技术应用于食品杀菌工业中。近年来,随着科学技术的飞速发展,国内外有关 HPEF 的研究范围逐渐扩大,除杀菌钝酶外,已有涉及食品干燥、解冻、果蔬保鲜、果蔬汁提取、胞内物质提取、酒类催陈和降解残留农药等多方面的研究。在美国、日本和德国等发达国家,有关 HPEF 设备的研究较多,在我国相对较少。作者就目前国内外利用 HPEF 技术在食品质量与安全中的研究现状做一概述,并对其发展前景进行展望。

1 HPEF 处理装置

HPEF 以较高的电场强度、较短的脉冲宽度和较高的脉冲频率对食品进行处理,目前多用于液态和半固态食品处理中。HPEF 处理系统主要由脉冲发生器、样品处理室、冷却装置和温度测定装置等

组成(见图 1),其中脉冲发生器和样品处理室是核心部位。脉冲发生器产生 10 kV 以上的脉冲被加到处理室的两极板上,使处理室内产生 10 kV/cm 以上的电场并作用于流经此室的食物。与其它加工技术相比, HPEF 技术具有较高的经济优势,一方面,采用该技术处理食品耗能低,据国外资料报道, HPEF 用于液态食品处理的操作费用只需 0.7 美分/L 的电费和 0.22 美分/L 的维护费,并且针对不同的处理对象选择最有效的处理波形时,费用还可进一步降低^[2]。另一方面,当输入相同的能量时,高压脉冲电场的处理效率明显高于其它处理技术,并且对食品原有功能物质破坏程度最小,能最大限度保持食品原有的品质和营养。由于 HPEF 装置造价昂贵,与美国、德国等一些发达国家相比,我国对 HPEF 系统装置的研制起步较晚。目前,在设备研究和制备方面俄亥俄州立大学处于国际领先地位,该大学已经建成一条处理能力达到每小时 2 000 L 的准工业化生产线。与国外相比,国内目前主要有江南大学、浙江大学、清华大学和大连理工大学等高校在开展 HPEF 设备的基础性研究,并在设备和处理室设计方面取得一定进展。大连理工大学利用大功率开关器件配合脉冲升压变压器研制出 10 kV 的脉冲发生器,该脉冲发生器精度较高,但其脉冲高压比较低;浙江大学研究者在绝缘空心管内安置平行平板电极,研制出一种连续式液态食品灭菌的 HPEF 处理室,该方法改善了处理室的电场分布,使场强分布均匀的同时有效保护电极,提高被处理食品的安全性^[3]。

2 HPEF 技术加工机理

到目前为止,国内外对 HPEF 加工机理的研究已有 40 多年的历史,主要形成了臭氧效应、电解产物效应、电磁机理模型、电崩解和电穿孔等观点,其中电崩解和电穿孔理论^[4-5]受到大部分专业人士的认可,并被广泛应用于食品杀菌、胞内物质提取和果蔬汁提取等食品工业生产实际中,在杀菌方面应用最广。

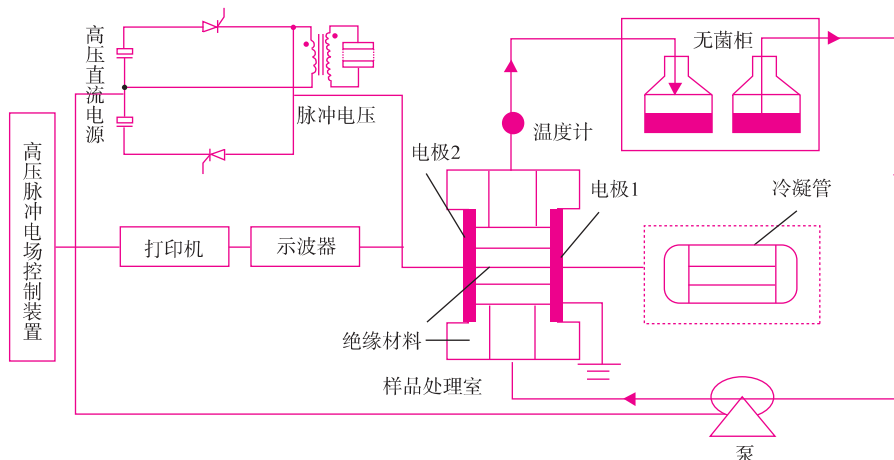


图1 高压脉冲电场杀菌装置示意图

Fig. 1 Scheme of HPEF sterilization

2.1 电崩解理论

电崩解理论认为,微生物的细胞膜可看作是一个电容器,在外加电场的作用下细胞膜上的电荷分离形成跨膜电位差,此电位差随着电场的增强而增大,当电位差达到临界电崩解电位差时,细胞膜破裂。若在此电崩解条件下,该细胞能自我愈合,则这种破裂是可逆的;若外加电场超过了临界电场强度或作用时间过长,此时产生的破裂是不可逆的,最终导致细胞死亡^[6],从而微生物死亡,达到灭菌目的。Zimmermann^[7]研究表明,细胞膜两侧受到的压力随着跨膜电位差的增大而增大,当跨膜电位差达到1V时,细胞膜产生黏弹性恢复力的速度远小于挤压力的增长速度,细胞膜被局部破坏,当外加电场超过临界电场时,细胞膜被大尺寸破坏,进而形成电崩解。魏新芳等^[8]在HPEF灭菌机理的研究中认为,细胞膜的电崩解是电穿孔形成的基础,与电穿孔理论相比,电崩解理论更科学,原因是:一方面,电穿孔是一种机械运动过程,而这一过程不会在几十微妙甚至几百纳秒内完成;另一方面,电穿孔是指在脉冲电场存在时,细胞膜上出现暂时不稳定的、穿孔的生物物理现象,而这种现象不适合被作为机理对待。王黎明等^[9]在HPEF杀菌机理的研究中,利用透射电子显微镜(TEM)观察经HPEF处理后的大肠杆菌和啤酒酵母菌,发现处理后两种细菌的细胞膜均变模糊,细胞质团聚、外流,导致细胞死亡,死亡后的细胞形态与电崩解理论较为吻合。这些研究结果说明在HPEF作用下,当场强超过临界值或作用时间过长时,细胞膜会产生不可逆崩解,进而导致

细胞死亡,达到杀菌效果。

2.2 电穿孔理论

电穿孔理论认为,外加电场的作用会改变脂肪的分子结构和增大部分蛋白质通道的开度,并使细胞膜压缩形成小孔,增强细胞膜通透性,从而使小分子物质透过细胞膜进入细胞内,最后导致细胞膨胀破裂,胞内物质外漏,使细胞死亡^[10]。电穿孔效应假说可以通过两种方法来证实:一是电子显微镜照片显示,在处理后的酵母菌菌体上具有明显的裂痕;二是对杀菌前后菌液中某一离子浓度进行检测,若该离子浓度升高,同时又可排除该离子的其它来源,则可以推断该离子浓度升高是由细胞破裂导致胞内物质外泄所致。郭清泉等^[11]对磷酸盐缓冲液中的乳酸杆菌进行高压脉冲电场杀菌,发现灭菌之后缓冲液中氯离子浓度高了很多。由于实验中排除了氯离子的其它来源,故而只能得出因乳酸杆菌细胞破裂,细胞内物质外泄导致氯离子浓度增加的结论。杨艳芹等^[12]在脉冲电场致细胞电穿孔的机理分析中报道,在静息电场中,电场势能和热运动能量的共同作用使膜分子受到的力如范德华力、氢键、疏水作用等相互平衡,进而膜分子处于平衡状态;当外加脉冲电场存在,且脉冲宽度大于 10^{-4} 时,分子受到的转矩和电势能发生变化,分子向势能低的方向移动,导致细胞膜结构迅速重组,膜上形成微孔。脉冲电场的周期作用使微孔有所增大,从而离子穿过膜进入细胞,使细胞膨胀,细胞膜变薄,微孔迅速增大,形成电穿孔。王翠华等^[13]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,在脉冲

电场作用下,绝大多数细胞发生电穿孔现象,产生不可逆变性,仅少数细胞虽然形态存在,但结构基本被破坏,发生程序性死亡。肖华娟等^[14]研究发现,HPEF产生的电穿孔效应具有累积效应,且随着电场强度或脉冲宽度的增加而增加。这些研究结果证实了电穿孔理论,说明HPEF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。

3 HPEF在食品质量控制中的应用

当前,食品质量问题越来越引起全社会的关注,并已成为我国农产品出口的壁垒,而落后的生产技术和影响我国食品质量的重要因素之一。据商务部统计^[15],在进出口贸易中,我国每年因技术性贸易壁垒造成的经济损失约90亿美元。要解决这一问题,当务之急是提高我国食品质量。因此,开发一种新型食品加工技术代替传统食品加工方法尤为重要。在多种新型食品加工技术中,如脉冲强光技术、电磁辐射技术和超高压技术等,HPEF技术在保持食品原有质量方面具有较强的可行性。HPEF技术在食品质量控制中的应用具体介绍如下。

3.1 钝酶延缓食品氧化变质

通过抑制酶活来控制果蔬采后新陈代谢,对提高果蔬的贮藏质量、延长货架期具有重要作用。吴有梅等^[16]以苹果为研究材料,发现通过抑制ACC合成酶和EFE的活性能够抑制乙烯合成,从而降低果肉细胞呼吸强度,延缓果实衰老。HPEF处理食品能够钝化酶或破坏食品中酶的结构^[17],从而导致酶失活,抑制相关生化反应,进而提高食品的贮藏质量。研究表明:HPEF对食品中多数酶具有钝化作用。梁国珍等^[18]研究发现HPEF能够使辣根POD的3级结构发生明显变化,降低酶活,且酶活性随着场强的增强和脉冲数的增加而下降;利用HPEF处理苹果汁,在处理条件为40 kV/cm、10 μ s时,PPO和POD失活率分别为71%和68%^[19],大大提高了果汁的抗氧化能力;Luo等^[20]研究了HPEF对PPO和LOX的影响,结果发现当场强为24 kV/cm时,作用时间为320 μ s PPO活性降低69%,作用时间为962 μ s LOX活性降低88%,且通过圆二色谱分析证明二者的二级结构发生了改变;Aguil等^[21]利用HPEF处理西瓜汁,发现HPEF对西瓜汁中POD、PME和PG具有钝化作用,从而提高了果汁的抗氧化性,保

持了食品的新鲜度;陈晨等^[22]研究表明:鲜榨胡萝卜汁在30 kV/cm、800 μ s的HPEF条件下处理后,其LOX和POD活性分别降至23.22%和46.97%,且HPEF处理后胡萝卜汁的总质量明显高于巴氏杀菌法处理后的胡萝卜汁;同样,HPEF处理也可钝化番茄汁中POD活性^[23],延缓其氧化变质。

3.2 对色泽和风味物质的影响

颜色和风味是评价食品的感官指标,它们直接影响消费者购买和消费食品的欲望。HPEF处理食品,可最好地保持食品原有的色泽和风味。研究表明,在35 kV/cm、750 μ s的条件下处理橙汁,类胡萝卜素和黄酮类物质得以提高^[24];在食品贮藏过程中,风味物质的稳定性较差,这种情况可通过适当的HPEF技术处理而得到改善。王艳芳等^[25]研究结果表明,采用HPEF技术处理牛乳,其风味物质损坏不明显,并且产生较少的与蒸煮味相关的含硫化合物;王寅等^[26]在HPEF和热处理对蓝莓汁品质影响的研究中,采用色差仪测定法和pH示差法,分别测定经HPEF处理后蓝莓汁的色泽和花青素变化,结果发现,与热处理相比,经HPEF处理后的蓝莓汁,其色泽更接近于原汁。另外,将HPEF处理后的蓝莓汁在4℃条件下贮藏30 d后,花青素的保留率达到84.85%,高于对照组(77.45%)和热处理(78.62%)蓝莓汁中花青素的保留率;张雯等^[27]从饱满度、气味和形态等方面研究HPEF对杨梅保鲜的影响,结果发现当杨梅存放至第5 d时,未经HPEF处理的杨梅变软,出现腐烂现象,而经HPEF处理过的杨梅相对饱满,无腐烂现象;当杨梅存放至第7 d时,未经HPEF处理的杨梅已经完全腐烂,酸腐气味明显,而经HPEF处理的杨梅略有变软。可见,HPEF技术对食品的风味、口感、颜色基本无影响,具有一定的保鲜作用。

3.3 对营养物质的影响

营养价值是评价食品新鲜度的重要指标。在食品的处理过程中,采用传统的加工方法虽然能延长食品货架期,但会降低食品的营养价值。HPEF处理食品,在适宜的处理参数下可最大限度减少风味物质和营养成分的损失,保持食品的营养价值及新鲜程度。研究表明,HPEF可减缓食品在贮藏过程中VC的降解速度,提高类胡萝卜素(Carotenoids)和类黄酮类(Flavonoids)物质含量,进而提高食品贮藏期的综合质量。如HPEF处理后豆乳中VC含量高

于热处理的豆乳^[28];Grimi 等^[29]利用 HPEF 辅助提取果汁,发现在 400 kV/cm 场强下分别处理苹果切片和全苹果后榨取果汁,全苹果中提取果汁的抗氧化能力和澄清度均高于苹果切片中提取的果汁,说明 HPEF 对全苹果内的功能成分破坏程度较小;潘东芬^[30]研究 HPEF 对胡萝卜汁品质的影响,发现当场强为 11.11 kV/cm 时,VC 保留率高达 97.8%;王冉等^[31]研究发现,经 HPEF 处理后的苹果中的碳水化合物含量有所增加,脂肪、蛋白质含量降低,但与其他方法相比,其含量仍相对较高,感官品质更接近于处理前样品。

在对食品进行干燥处理的过程中,HPEF 技术利用高强脉冲在较低温度下对细胞膜及液泡膜进行可逆击穿,增强其通透性,提高了脱水速度,避免了食品组织结构中功能成分的大量流失;在食品的解冻处理过程中,HPEF 能加快食品解冻速度、减少汁液流失、使解冻过程中食品温度分布均匀,减少营养物质破坏,保持了食品质量。Ade-Omowaye 等^[32]研究了 HPEF 对红辣椒脱水的影响,与其它脱水方法相比,HPEF 处理不仅能保持原有的组织结构,而且能够最小程度损失 VC;王维琴等^[33]研究表明:用 2 kV/cm、70 μ s 和 1 kV/cm、50 μ s 处理甘薯分别得到较高的热风干燥速率,缩短了干燥时间,从而减少了营养物质的流失;方胜等^[34]研究表明,HPEF 技术可明显缩短食品解冻时间,从而有效防止由解冻时间过长造成的营养物质过多流失。

此外,将冷冻浓缩技术与 HPEF 技术相结合,可以用来解决某些高浓度液态食品由于具有较高的电导率导致处理过程中食品温度升高而造成的食品营养物质损失问题。方婷等^[35]研究表明,HPEF 集成冷冻浓缩技术由于操作过程处理温度低,降低了液体的电导率,从而避免了在处理过程中产生的大量热对功能成分的损害;陈梅英等^[36]发现采用 HPEF 集成冷冻浓缩技术加工果汁,能较好地保存果蔬汁原有感官性质和营养价值;叶丽珠等^[37]利用 HPEF 处理冷冻浓缩后的西瓜汁,发现处理后的样品品质很好,接近于西瓜原汁。可见,HPEF 处理后的食品样品的气味、色泽和营养价值方面均高于经其它技术处理的样品。

3.4 对乙烯的影响

乙烯是一种促进果蔬成熟的激素,果蔬中乙烯含量的增加会激发呼吸强度,从而导致营养物质的

消耗和保鲜期的缩短。孙贵宝等^[38]以青椒为材料研究了高压静电场对果蔬新鲜度的影响,发现在多种处理方法中,不同场强的高压静电场处理后的青椒乙烯释放量的高峰值均低于对照组(0 kV/m),且场强为 60 kV/m 时,乙烯释放量的高峰值相对最小。可见,高压静电场处理样品可抑制乙烯的释放。抑制果蔬内部乙烯生成可降低果蔬的呼吸作用,减少营养物质的消耗,从而提高果蔬的贮藏质量,延长货架期。HPEF 是否与高压静电场处理一样对果蔬乙烯释放量产生影响,有待进一步研究。

4 HPEF 在食品安全中的应用

食品质量安全与人类的生命健康息息相关,关系到经济的发展和社会的稳定,是近年来人们及关注的社会公共问题。用 HPEF 处理食品能够抑制食品微生物生长,降解残留农药,有助于减少使用食品添加剂,从而有效提高食品安全性,延长食品货架期^[39],促进食品行业的快速发展,具有显著的社会经济效益。

4.1 灭菌防止食品腐败变质

杀菌是食品生产中十分重要的环节,杀菌效果的好坏直接影响着食品的质量与安全性。用传统的热加工方法对果蔬汁进行杀菌处理,会严重损失果蔬汁原有的风味物质和营养成分^[40]。HPEF 技术与其它杀菌技术相比,能够在较低的温度下杀灭微生物,较好地保持食品的营养物质和天然特性。最近,在对 HPEF 杀菌机理的研究中,陈晨等^[41]以大肠杆菌为材料研究发现,HPEF 可破坏微生物体内蛋白质的二级结构,可能引起微生物的新陈代谢紊乱,进而导致微生物死亡。大量研究报道^[42],HPEF 能够有效杀灭大部分微生物;不同微生物对 HPEF 的抗性是不同的,在相同 HPEF 条件下,不同菌种存活率表现为霉菌、大肠杆菌、酵母菌依次降低。在不同介质中灭菌效果也不同,电导率和粘稠度越低,密度越高的介质灭菌效果越好。

Zhao 等^[43]在 HPEF 对绿茶饮料中微生物的失活和理化性质影响的研究中表明,利用 HPEF 处理绿茶饮料,能显著降低微生物菌落,稍微改变饮料的颜色和氨基酸总量,在 4 $^{\circ}$ C 的贮藏温度下可延长其保质期 6 个月。方婷等^[44]探讨了 HPEF 对瓶装饮用水中不同微生物的灭菌效果,结果表明经场强为 48.39 kV/cm 的 HPEF 处理不同时间后,均未有大肠

杆菌、啤酒酵母和青霉菌的活菌检出,在相同场强处理下经 295 μs 之后金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的活菌数分别有 6.6 和 5.5 个对数的减少。也有研究表明,温度对 HPEF 杀菌具有协同作用。陈拓等^[45]在 HPEF 对胡萝卜汁的杀菌效果研究中表明,在 30 kV/cm, 20 Hz 的实验条件下,当水浴温度由 4 $^{\circ}\text{C}$ 升至 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,大肠杆菌总数下降由 2.9 个对数增加到 3.9 个对数。赵伟等^[46]在 HPEF 与热协同对液态蛋杀菌的研究中表明,与巴氏杀菌相比,HPEF 与热协同对液态蛋具有较好的杀菌效果,且起泡和乳化性能均有提高,色泽和黏度的变化很小。对 HPEF 在梨汁^[47]、葡萄汁^[48]等其它果蔬的处理中也有类似报道。

此外,HPEF 处理后的食品中不会产生对人体有害的自由基。而其它一些加工方法如辐照、超声波处理等,会使食品产生自由基^[49-50],而这些自由基会促进人体衰老、削弱细胞的抵抗力、破坏体内蛋白质和酶、引起心脑血管疾病等。目前,HPEF 技术在有效杀死微生物过程中,没有发现有害物质产生,而且有利于食品的贮藏,延长食品的货架期,提高食品的安全性。

4.2 在降解残留农药中的作用

目前,由于病害和虫害抗药性的增强,不合理地使用农药已成为引起食品安全事件的因素之一,导致农作物在食用期残留未降解农药,威胁着人类的身体健康。研究表明 HPEF 技术对果蔬采后残留的未降解农药具有降解作用,国内外关于 HPEF 对有害小分子农药的降解已有报道^[51]。Chen 等^[52]利用 HPEF 处理苹果汁,发现 HPEF 能显著降解苹果汁中残留的甲胺磷和毒死蜱,且降解作用随着电场强度和脉冲数的增加而增强;张若兵等^[53]研究了 HPEF 电场对豆浆中残留农药的降解作用,结果表明经 HPEF 处理后,豆浆中乐果、马拉硫磷和甲胺磷等 6 种残留药物均有不同程度的降解。此外,宋萍等^[54]在农药降解动力学模型的改进研究中,构造出一种新型农药降解非线性动力学模型,该模型适用性广,并且可描述降解曲线凹凸有拐点的情形,同时对预测农药降解动态具有一定的理论价值。若将该非线性动力学模型应用到有关 HPEF 降解残留农药的研究中,可更直观地描述出 HPEF 对残留农药的降解动态。

4.3 减少食品添加剂的使用

在绿色蔬菜的加工和储藏过程中,叶绿素极易

被降解,生产中经常使用护色剂和保鲜剂来保持蔬菜绿色而维持蔬菜的感官质量,吸引消费者购买产品。殷涌光等^[55]在应用高压脉冲电场加工天然绿色蔬菜饮料的方法中表明,在 50~70 kV/cm 的 HPEF 条件下,70 kV/cm 最宜,处理添加 75 mg/kg 葡萄糖酸锌的新鲜菠菜汁,可使菠菜汁长期保持绿色,减少使用添加剂含量,提高食用安全性。

高蛋白含量食品经久存后会发生蛋白质二次沉淀现象,利用 HPEF 技术处理蛋白含量较高的液态食品,可避免食品中蛋白质沉淀物的产生,如利用 HPEF 技术处理酱油沉淀前体物,可破坏其胶体结构,使大分子物质迅速沉淀,从而过滤除去,同时可降解多肽,去除二次沉淀前体物,使得酱油存放 6 个月无沉淀产生^[56];另一方面,HPEF 可有效促进鲜肉中蛋白质降解,显著增加总氨基酸含量,提高鲜肉的营养价值。鲜肉经 10 s HPEF 短时处理,其鲜味物质谷氨酸含量可增加 82.3%^[57]。此外,经 HPEF 处理后的白酒总酸和总酯含量都有所增加,陈香明显,辛辣味减少,绵软柔和并带有余香;另外,贮存一年的白酒经 HPEF 处理后可达到陈酿 6 年的效果^[58]。这些研究结果都说明利用 HPEF 技术对某些食品具有显著的增鲜作用,可避免或减少相关食品添加剂的使用。

5 展望

HPEF 技术能够显著提高果蔬的出汁率和果汁纯度,具有较好的杀菌、保鲜效果,同时能最大限度地保持食品的天然性质和营养价值,可有效提高食品质量与安全性。但是,HPEF 技术在固态食品中的应用研究较少,因为脉冲会引起电化学反应产生气泡,气泡击穿会使介质迅速膨胀,若介质为固体食品,则会因过压而导致局部爆炸,存在危险性。HPEF 技术在固态食品中的应用有待进一步研究。同时,利用 HPEF 处理食品也有一些问题需要引起注意:如 HPEF 处理能否导致食品中微生物遗传物质的改变?处理过程中是否能确保不产生对人体有害的物质?而这些问题将会潜在地影响着人体健康,如降低人体免疫力、影响人体正常新陈代谢等。今后,应该加强从分子水平上研究 HPEF 对食品组分的影响机制及其杀菌钝酶机理,同时要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。

目前,一些发达国家对 HPEF 技术的应用已逐渐从实验室阶段向商业化过度,我国对 HPEF 的研究仍处在实验室阶段。我国研究者正将 HPEF 技术与其它学科紧密结合,不断探究 HPEF 技术在食品工业中的最新应用及其在应用中的最适条件,如最适电场强度、最适脉冲波形、最适脉冲宽度和最适

温度等,并不断改进 HPEF 的处理系统,研制大功率、高精度、调控性能好的脉冲发生器和动态处理室,以改变我国在这一研究领域落后的现状。随着研究者对 HPEF 技术的深入研究以及对 HPEF 设备的不断改进,相信将 HPEF 技术实现工业化指日可待。

参考文献:

- [1] Toepfl S, Heinz V, Knorr D. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation [J]. **Chemical Engineering and Processing**, 2007, 46(6): 537-546.
- [2] 吴新颖, 李钰金, 郭玉华, 等. 高压脉冲电场技术在食品加工中的应用[J]. **中国调味品**, 2010, 35(9): 26-29.
WU Xin-ying, LI Yu-jin, GUO Yu-hua, et al. The application of high voltage pulsed electric field technology in food processing [J]. **China Condiment**, 2010, 35(9): 26-29. (in Chinese)
- [3] 应雪正, 王剑平, 叶尊忠. 国内外高压脉冲电场食品杀菌关键技术概况[J]. **食品科技**, 2006(3): 4-8.
YING Xue-zheng, WANG Jian-pin, YE Zun-zhong. Key techniques of high voltage pulsed electric field on food sterilization field[J]. **Journal of food science and technology**, 2006(3): 4-8. (in Chinese)
- [4] Aronsson K, Borch E, Stenlof B, et al. Growth of pulsed electric field exposed *Escherichia coli* in relation to inactivation and environmental factors[J]. **International Journal of Food Microbiology**, 2004, 93(1): 1-10.
- [5] Wouters P C, Bos A P, Ueckert J. Membrane permeabilization in relation to inactivation kinetics of *Lactobacillus* species due to pulsed electric fields[J]. **Applied and Environmental Microbiology**, 2001, 67(7): 3092-3101.
- [6] Heinz V, Alvarez L, Angersbach A, et al. Preservation of liquid foods by high intensity pulsed electric fields—basic concepts for Process design[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2002, 12: 103-111.
- [7] Zimmermann U. Electrical breakdown, electroporation and electrofusion [J]. **Reviews on physiological biochemical pharmacology**, 1986, 105: 175-256.
- [8] 魏新芳, 李家辉, 延二宝. 脉冲电场灭菌机理分析及细菌失活模型的研究[J]. **电机与控制学报**, 2011, 15(1): 7-12.
WEI Xin-lao, LI Jia-hui, YAN Er-bao. Analyses of pulsed electric field sterilization mechanism and bacterial inactivation model [J]. **Journal of electric machines and control**, 2011, 15(1): 7-12. (in Chinese)
- [9] 王黎明, 史梓男, 关志成, 等. 脉冲电场非热杀菌效果分析[J]. **高电压技术**, 2005, 31(2): 64-67.
WANG Li-ming, SHI Zi-nan, GUAN Zhi-cheng, et al. An analysis of non-thermal sterilization effect by pulsed electric field[J]. **High Voltage Technology**, 2005, 31(2): 64-67. (in Chinese)
- [10] Vega M H, Martin B O, Qing B L, et al. Non-thermal food preservation: Pulsed electric fields [J]. **Trends in Food Science & Technology**, 1997, 8(5): 151-157.
- [11] 郭清泉, 张兰威, 林淑英. 酸奶发酵机理及后酸化控制措施[J]. **食品与发酵工业**, 2000, 25(2): 80-83.
GUO Qing-quan, ZHANG Lan-wei, LIN Shu-ying. The fermentation mechanism and control measures of yogurt post-acidification[J]. **Journal of Food and Fermentation Industry**, 2000, 25(2): 80-83. (in Chinese)
- [12] 杨艳芹, 谢菊芳, 夏利霞, 等. 脉冲电场致细胞膜电穿孔的机理分析[J]. **湖北大学学报: 自然科学版**, 2006, 28(2): 165-168.
YANG Yan-qin, XIE Ju-fang, XIA Li-xia, et al. An analysis of electroporation mechanism caused by pulse electric field[J]. **Journal of Hubei University: Natural Science Edition**, 2006, 28(2): 165-168. (in Chinese)
- [13] 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): 548-550.
WANG Cui-hua, WU Yan, LI Guo-feng. Effect of pulse discharge on the ultrastructure of *Microcystis aeruginosa* cells[J]. **Journal of Hebei University: Natural Science Edition**, 2010, 30(5): 548-550. (in Chinese)
- [14] 肖华娟, 严萍, 牟群. 强脉冲电场致细胞膜穿孔的实验研究[J]. **中国科学院研究生院学报**, 2005, 22(4): 462-467.
XIAO Hua-juan, YAN Pin, MOU Qun. An experimental study of cell membrane perforation caused by strong pulse electric field [J]. **Journal of graduate school of Chinese academy of sciences**, 2005, 22(4): 462-467. (in Chinese)
- [15] 陈羽. 浅析我国农产品出口遭遇技术性贸易壁垒的原因及对策[J]. **法制与经济**, 2009(204): 95-96.

- CHEN Yu. The analyses of causes and countermeasures of China's agricultural products exports encountered technical barriers to trade[J]. **Journal of law and economy**, 2009(204):95-96. (in Chinese)
- [16] 吴有梅, 华雪增, 方建雄, 等. 贮藏温度和气体组成对苹果乙烯生物合成的影响[J]. 植物生理学报, 1991, 17(2):169-176.
WU You -mei, HUA Xue -zeng, FANG Jan -xiong, et al. Effects of storage temperature and gas composition on ethylene biosynthesis in Apple[J]. **Journal of plant physiology**, 1991, 17(2):169-176. (in Chinese)
- [17] 卢丞文, 殷涌光. 高压脉冲电场技术对食品中生物活性成分的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(20):10590-10592.
LU Cheng-wen, YIN Yong-guang. Influence of high voltage pulse electric field on the biological active ingredients in food[J]. **Journal of Anhui agricultural science**, 2012, 40(20):10590-10592. (in Chinese)
- [18] 梁国珍, 孙沈鲁, 陈英梅, 等. 高压脉冲电场对辣根过氧化物酶活性及构象影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(3):21-24.
LIANG Guo-zhen, SUN Shen-lu, CHEN Ying-mei, et al. Influence of high voltage pulse electric field on peroxidase activity and conformation of Horseradish[J]. **Journal of food and machinery**, 2008, 24(3):21-24. (in Chinese)
- [19] Riener J, Noci F, Cronin D A, et al. Combined effect of temperature and pulsed electric fields on apple juice peroxidase and polyphenoloxidase inactivation[J]. **Food Chemistry**, 2008, 109(2):402-407.
- [20] Luo W, Zhang R B, Wang L M, et al. Conformation changes of polyphenol oxidase and lipoxygenase induced by PEF treatment [J]. **Journal of Applied Electrochemistry**, 2010, 40(2):295-301.
- [21] Aguilo A I, Soliva F R, Martin B O. Color and viscosity of watermelon juice treated by high-intensity pulsed electric fields or heat[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 2010, 11(2):299-305.
- [22] 陈晨, 赵伟, 杨瑞金. 高压脉冲电场对鲜榨胡萝卜汁的品质和内源酶活力影响[J]. 北京工商大学学报:自然科学版, 2011, 29(3):28-32.
CHEN Chen, ZHAO Wei, YANG Rui-jin. Influence of high voltage pulse electric field on the quality and endogenous enzyme activity of fresh carrot juice [J]. **Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition**, 2011, 29(3):28-32. (in Chinese)
- [23] Aguilo A I, Soliva F R, Martin B 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.
- [24] Plaza L, Sanchez M C, Ancos B D, et al. Carotenoid and flavanone content during refrigerated storage of orange juice processed by high-pressure, pulsed electric fields and low pasteurization[J]. **Food Science and Technology**, 2011, 44(4):834-839.
- [25] 王艳芳, 杨瑞金, 赵伟, 等. 高压脉冲电场对牛奶中风味物质的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(11):43-46.
WANG Yan-fang, YANG Rui-jin, ZHAO Wei, et al. Effects of high voltage pulse electric fields on flavor compounds in milk[J]. **Food Science**, 2009, 30(11):43-46. (in Chinese)
- [26] 王寅, 陶晓鹭, 陈健, 等. 高压脉冲电场和热处理对蓝莓汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012(19):68-71.
WANG Yin, TAO Xiao-bin, CHEN Jian, et al. Influences of high voltage pulse electric fields and heat treatments on the quality of blueberry juice[J]. **Science and technology of food industry**, 2012(19):68-71. (in Chinese)
- [27] 张雯, 韩其国, 朱英俊, 等. 高压脉冲电场技术在杨梅保鲜中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(2):73-77.
ZAHNG Wen, HAN Qi-guo, ZHU Ying-jun, et al. Study on Application of high voltage pulse electric fields in the preservation of Bayberry[J]. **Science and technology of food industry**, 2012, 33(2):73-77. (in Chinese)
- [28] Pena M M L, Salvia T L, Rojas G M A, et al. Impact of high intensity pulsed electric field on antioxidant properties and quality parameters of a fruit juice-soymilk beverage in chilled storage[J]. **Food Science and Technology**, 2010, 43(6):872-881.
- [29] Grimi N, Mamouni F, Lebovka N, et al. Impact of appel processing modes on extracted juice quality: Pressing assisted by pulsed electric fields[J]. **Journal of food Engineering**, 2011, 103(1):52-61.
- [30] 潘东芬. 高压脉冲电场处理对胡萝卜汁的杀菌效果及品质影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
PAN Dong-fen. Study on high voltage pulse electric field treatment on the effects of sterilization and quality of carrot juice[J]. **Wuxi: Jiangnan University**, 2011. (in Chinese)
- [31] 王冉, 郭玉明. 高压脉冲电场对苹果某些营养素的影响[A]. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集[C]. 2011.
WANG Ran, GUO Yu-ming. Influence of high voltage pulse electric field on certain nutrients in apple[A]. **2011 annual meeting memoir of the Chinese academy of agricultural engineering[C]**. 2011. (in Chinese)
- [32] Ade-Omowaye B I O, Talens P, Angersbach A, et al. Kinetics of osmotic dehydration of red bell peppers as influenced by pulsed

- electric field pretreatment[J]. **Food Research International**, 2003, 36(5):475.
- [33] 王维琴,盖玲,王剑平,等. 高压脉冲电场预处理对甘薯干燥的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 8(8):154-156.
WANG Wei-qin, GAI Ling, WANG Jian-ping, et al. Effect of high voltage pulse electric field pretreatment on sweet potatoes dry [J]. **Journal of Agricultural machinery**, 2005, 8(8):154-156. (in Chinese)
- [34] 方胜,孙学兵,陆守道,等. 冷冻食品的高压脉冲电场处理[J]. 包装与食品机械, 2003, 21(6):1-5.
FANG Sheng, SUN Xue-bing, LU Shou-dao, et al. High voltage pulse electric field treatment on frozen food [J]. **Packaging and food machinery**, 2003, 21(6):1-5. (in Chinese)
- [35] 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(17):170-173.
FANG Ting, ZHONG Hai-rong, CHEN Jin-quan. Study on high voltage pulse electric field treatment on frozen concentrate loquat juice[J]. **Journal of Anhui Agricultural science bulletin**, 2011, 17(17):170-173. (in Chinese)
- [36] 陈梅英,龚雪梅,王文成,等. 高压脉冲电场集成冷冻浓缩加工果汁初探[J]. 中国农学通报, 2008(4):440-444.
CHEN Mei-ying, GONG Xue-mei, WANG Wen-cheng, et al. Study of fruit juice processing by the combination of high voltage pulse electric field and freeze concentration technology[J]. **Journal of China agricultural science bulletin**, 2008(4):440-444. (in Chinese)
- [37] 叶丽珠,龚雪梅,陈锦权. 高压脉冲电场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):52-59.
YE Li-zhu, GONG Xue-mei, CHEN Jin-quan. Study of the effect of high voltage pulse electric field on the quality of watermelon juice[J]. **Journal of Guizhou University: Natural Science Edition**, 2011, 28(6):52-59. (in Chinese)
- [38] 孙贵宝,刘铁玲,梁鹏,等. 高压静电场处理对青椒鲜度保持的影响[J]. 农机化研究, 2007(3):134-136.
SUN Gui-bao, LIU Tie-ling, LIANG Peng, et al. Effects of high voltage pulse electric field on green pepper freshness[J]. **Journal of Agricultural mechanization research**, 2007(3):134-136. (in Chinese)
- [39] 杜存臣,颜惠庚. 高压脉冲电场非热杀菌技术研究进展[J]. 现在食品科技, 2005, 21(3):151-154.
DU Cun-chen, YAN Hui-geng. Advances of high voltage pulse electric field non-thermal sterilization techniques[J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2005, 21(3):151-154. (in Chinese)
- [40] 焦忠高,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.
JIAO Zhong-gao, LIU Jie-chao, WANG Si-xin. Nonthermal processing technology and its safety evaluation for fruit and vegetable juices[J]. **Food Science**, 2004, 25(11):340-345. (in Chinese)
- [41] 陈晨,赵伟,杨瑞金,等. 高压脉冲电场对大肠杆菌胞内蛋白的影响[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4):25-28.
CHEN Chen, ZHAO Wei, YANG Rui-jin, et al. Effects of high voltage pulse electric field on *Escherichia coli* intracellular protein[J]. **Journal of Food and Fermentation Industry**, 2012, 38(4):25-28. (in Chinese)
- [42] 李静,肖健夫,陈杰,等. 高压脉冲电场对苹果汁中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的钝化效果[J]. 食品与发酵工业, 2010, 35(8):41-45.
LI Jing, XIAO Jian-fu, CHEN Jie, et al. The passivation effects of high voltage pulse electric field on *Escherichia coli* and *staphylococcus aureus* in apple juice[J]. **Journal of Food and Fermentation Industry**, 2010, 35(8):41-45. (in Chinese)
- [43] Zhao W, Yang R J, Lu R R, et al. Effect of PEF on microbial inactivation and physical-chemical properties of green tea extracts [J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2008, 41(3):425-431.
- [44] 方婷,余林林,陈彬彬,等. 高压脉冲电场处理瓶装饮用水的研究[J]. 贵州大学学报:自然科学版, 2011, 28(3):55-60.
FANG Ting, YU Lin-lin, CHEN Bin-bin, et al. Study on bottled drinking water treated by high voltage pulse electric field[J]. **Journal of Guizhou University: Natural Science Edition**, 2011, 28(3):55-60. (in Chinese)
- [45] 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.
CHEN Tuo, YANG Rui-jin, ZHANG Sha, et al. Effects of high voltage pulse electric field on sterilization effect and carotenoid content of carrot juice[J]. **Journal of Food and Fermentation Industry**, 2010, 36(7):41-44. (in Chinese)
- [46] 赵伟,杨瑞金,张文斌,等. 高压脉冲电场与热协同对液态蛋杀菌的新工艺及其对液态蛋品质的影响 [J]. 江苏农业学报, 2011, 27(1):152-159.
ZHAO Wei, YANG Rui-jin, ZHANG Wen-bin, et al. Effects of high voltage pulse electric field and thermal collaborative on

- sterilization effect and quality of liquid egg[J]. **Journal of Jiangsu Agriculture**, 2011, 27(1):152-159.(in Chinese)
- [47] 赵瑾, 杨瑞金, 赵伟, 等. 高压脉冲电场对鲜榨梨汁的杀菌效果及其对产品品质的影响[J]. **农业工程学报**, 2008, 24(6):239-244.
- ZHAO Jin, YANG Rui-jin, ZHAO Wei, et al. Effects of high voltage pulse electric field on sterilization effect and quality of fresh pear juice[J]. **Journal of Agricultural Engineering**, 2008, 24(6):239-244.(in Chinese)
- [48] Praporseic I, Lebovka N, Vorobiev E, et al. Pulsed electric field enhanced expression and juice quality of white grapes[J]. **Separation and Purification Technology**, 2007, 52(3):520-526.
- [49] 唐建华, 胡芳芳. 辐照食品的电子自旋共振(ESR)研究[J]. **中国辐射卫生**, 2005, 14(1):69-71.
- TANG Jian-hua, HU Fang-fang. Study on electron spin resonance (ESR) of irradiation food [J]. **Chinese Journal of Radiological Health**, 2005, 14(1):69-71.(in Chinese)
- [50] 何玉晖. 超生辐照乳液聚合引发机理的研究[A]. 2006年全国高分子材料科学与工程研讨会论文集[C]. 2006:186-187.
- HE Yu-hui. The mechanism study of super living irradiated emulsion polymerization [A]. **National symposium on polymer materials science and engineering**[C]. 2006:186-187.(in Chinese)
- [51] Zhang Y, Liao X J, Ni Y Y, et al. Kinetic analysis of the degradation and its color change of cyaniding-3-glu-coside exposed to pulsed electric field[J]. **European Food Research and Technology**, 2007, 224(5):597-603.
- [52] Chen F, Zeng L Q, Zhang Y Y, et al. Degradation behaviour of methamidophos and chlorpyrifos in apple juice treated with pulsed electric fields[J]. **Food Chemistry**, 2009, 112(4):956-961.
- [53] 张若兵, 陈杰, 肖健夫, 等. 高压脉冲电场设备及其在食品非热处理中的应用[J]. **高电压技术**, 2011, 37(3):777-785.
- ZHANG Ruo-bing, CHEN Jie, XIAO Jian-fu, et al. High voltage pulse electric field device and its application in non-thermal food processing[J]. **High voltage technology**, 2011, 37(3):777-785.(in Chinese)
- [54] 宋萍, 洪伟, 吴承祯, 等. 农药降解动力学模型的改进研究[J]. **中国生态农业学报**, 2005, 13(2):68-70.
- SONG Ping, HONG Wei, WU Cheng-zhen, et al. Study on the improvement of the kinetic model for degradation of pesticides[J]. **Chinese Journal of eco-agriculture**, 2005, 13(2):68-70.(in Chinese)
- [55] 殷涌光, 韩勇, 刘静波, 等. 应用高压脉冲电场加工天然绿色蔬菜饮料的方法研究[J]. **食品工业科技**, 2006, 27(4):150-151.
- YIN Yong-guang, HAN Yong, LIU Jing-bo, et al. Study on the application of high voltage pulse electric field in the processing of natural green vegetable beverage[J]. **Science and Technology of Food Science**, 2006, 27(4):150-151.(in Chinese)
- [56] 吴海霞. 高压脉冲电场杀菌技术在食品工业中的应用进展[J]. **农业与技术**, 2009, 29(3):132-135.
- WU Hai-xia. Advances on application of high voltage pulsed electric field technology in food industry [J]. **Agriculture & Technology**, 2009, 29(3):132-135.(in Chinese)
- [57] 曾新安, 高大维, 李国基, 等. 高压脉冲电场肉类增鲜效果研究[J]. **食品科学**, 1997, 18(4):34-37.
- ZENG Xin-an, GAO Da-wei, LI Guo-ji, et al. Study on the effect of increase fresh of meat by high voltage pulsed electric field [J]. **Food Science**, 1997, 18(4):34-37.(in Chinese)
- [58] 殷涌光, 赫桂丹, 石晶, 等. 高电压脉冲电场催陈白酒的试验研究[J]. **酿酒科技**, 2005(138):47-50.
- YIN Yong-guang, HAO Gui-dan, SHI Jing, et al. Experimental study on the spirit aging by high voltage pulsed electric field[J]. **Brewing Technology**, 2005(138):47-50.(in Chinese)