

脉冲电场技术在食品工业上的应用进展

熊强, 董智勤, 朱芳州

(南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京 211800)

摘要: 当前食品工业加工方法主要依赖于传统的热处理与化学方法, 这些方法往往会对食品质量和安全性产生负面影响, 且存在高成本、环境不友好等弊端, 开发高效、绿色的食品加工方法已成为食品业界亟待解决的难题。脉冲电场(Pulsed Electric Field, PEF)技术是一种利用高电压振幅的电磁脉冲对物料进行处理的物理方法, 作为一种新兴的非热加工技术, PEF技术因其独特的优势吸引了广大学者对其进行广泛而深刻的讨论, 以期将其应用于食品工业。该研究综述了脉冲电场技术的原理、应用机制, 包括电穿孔理论、电流体、等离子体以及电化学反应与自由基激活假说, 并对其在食品工业上的应用进行总结与归纳, 为食品加工领域提供了有效的解决方法, 有利于推动脉冲电场技术在食品加工领域的发展与应用。

关键词: 脉冲电场; 电穿孔; 等离子体; 食品加工

文章编号: 1673-9078(2022)02-326-339

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.2.0428

Progress in the Application of Pulsed Electric Field in Food Industry

XIONG Qiang, DONG Zhiqin, ZHU Fangzhou

(College of Food and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Currently, food industrial processes mainly rely on traditional thermal treatment and chemical methods. These methods often have a negative impact on food quality and safety, and possess disadvantages such as high cost and environmental unfriendliness. The development of efficient and green food processing methods has become an urgent problem to be solved in the food industry. Pulsed electric field (PEF) technology is a physical method that uses electromagnetic pulses with high voltage amplitude for processing materials. As an emerging non-thermal processing technology, PEF technology has attracted extensive and profound discussions among scholars due to its unique advantages and the aim to apply it to the food industry. This article reviews the principle and application mechanism of PEF technology, including electroporation theory, electrohydrodynamics, plasma and electrochemical reactions and free radical activation hypotheses, and summarizes the applications of PEF in food industry. The review provides effective solutions for the food processing field, which is conducive to promoting the development and application of PEF technology in the field of food processing.

Key words: pulsed electric field; electroporation; plasma; food processing

引文格式:

熊强,董智勤,朱芳州.脉冲电场技术在食品工业上的应用进展[J].现代食品科技,2022,38(2):326-339,+255

XIONG Qiang, DONG Zhiqin, ZHU Fangzhou. Progress in the application of pulsed electric field in food industry [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 326-339, +255

随着新鲜、营养、健康的观念深入人心, 消费者对食品营养与安全的要求越来越高, 这种需求也推动了新兴绿色环保型食品加工技术的发展。目前, 在食品工业上所广泛使用的传统热加工和化学处理技术, 如热杀菌、热风干燥、化学萃取等, 往往存在效率低、运行成本高、环境不友好等弊端^[1], 较高的处理温度也限制了其在温度敏感型食品加工中的应用, 常导致食品感官质量和营养发生不良改变。在此背景之下脉

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 江苏省重点研发现代农业项目 (BE2019372)

作者简介: 熊强(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 微生物与发酵, E-mail:

xiongqiang@njtech.edu.cn

冲电场技术(pulsed electric field, PEF)应运而生, 作为一种新型非热食品加工技术, PEF技术可以在处理过程中保持较低的温度, 对食品的色、香、味以及营养成分影响小, 已经成为目前研究开发的重点^[2]。

电场技术在食品行业的应用可以追溯到20世纪20年代末对奶制品的杀菌处理, 20世纪50年代开始利用高压脉冲放电杀菌, 上世纪90年代以来, 随着对PEF技术理论研究的深入, 脉冲电场技术逐渐成为全球非热加工领域备受关注的技术之一。与其他食品加工技术相比, PEF技术作为一种新兴的物理加工技术, 其主要优点在于效率高、能耗小、副产物少, 对环境无污染且在加工过程中食品温度没有明显变化, 对物

料风味特征进行充分保护,因此,该方法几乎可以应用于任何对温度敏感的食物基质,例如水果和蔬菜。目前,脉冲电场技术已被证实食品保鲜^[3]、辅助发酵^[4]、辅助提取^[5]、辅助干燥^[6]、辅助冷冻、解冻^[7]以及抑制酶活^[8]等领域具有可观的效果。本文对PEF的原理、应用机制和在食品工业上的应用进行了详细介绍,并对其未来在食品行业的发展与推广进行了展望。

1 脉冲电场技术概述

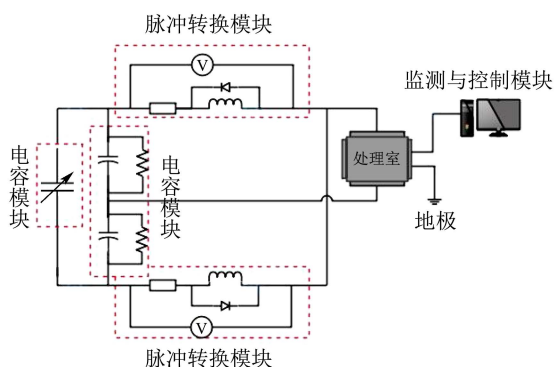


图1 可产生双极脉冲的PEF系统

Fig.1 PEF system with bipolar pulse

脉冲电场(PEF)是一种将短脉冲电施加于两个电极之间的电场技术,其脉宽往往在几纳秒到几毫秒之间,电场强度一般为 $0.1\sim 100\text{ kV}^{[9]}$ 。PEF处理系统主要由五个部分组成如图1所示:1)高压电源;2)用于能量存储和放电的电容器组;3)提供给定电压,波形和脉宽的脉冲发生器;4)用于设置和监控条件的控制系统;5)至少配备放电电极和接地电极两个电极的处理室,根据被处理样品的状态(固体、半固体、液体、半液体),可分为批量处理室和连续处理室^[10]。脉冲电场的电极结构通常遵循平面、同轴和轴向几何的原则。脉冲波形一般有方波、指数衰减波以及钟形波,其中方波和指数衰减波在实际应用中较为常见^[11]。方波是通过一系列输送电线模拟的电感电容产生,而指数衰减波由简单的电容充放电产生,相较而言,平方波的脉冲发生电路价格较昂贵,但方波比指数衰减波具有更高的能量和使细胞失活的效果。根据脉冲波极性的不同通常可分为单极脉冲和双极脉冲两种典型,单极脉冲是一组正波或负波,而双极脉冲是一组由一个正波和一个负波组成的脉冲对,与单极脉冲相比,双极脉冲对细胞膜的通透性更有效。

电场强度、脉冲数、处理时间、脉冲波形、处理温度和能量密度是影响脉冲电场处理效果重要的参数^[12-13]。应用于食品工业的脉冲电场其电场强度一般为 $0.1\sim 80\text{ kV/cm}$,可以通过改变电源输出电压、电极间的间隙以及电极的形状得到较优的脉冲处理方案。S.

H O^[14]等指出圆盘形、圆形边缘的电极有助于将电场强度最小化,并降低流体食物的介电击穿的可能性。针状电极则被认为更容易产生电晕放电、介电阻挡放电和表面放电^[15]。

尽管电场技术通常被认为是一种非热加工技术,但在产生脉冲电场时依然不可避免地会产生一定程度的欧姆热^[16],然而这一热能的产生往往是可控的,Fiala等^[17]对基于脉冲电场的电-液耦合模型进行了数值模拟,结果发现了幅值小于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度上升,类似结果在Gerlach等^[18]的研究中被发现,而在较快的脉冲电场处理中这一欧姆热甚至难以被捕捉到。

2 脉冲电场应用机制概述

脉冲电场的应用机制仍在不断的探索中,关于PEF在杀菌以及传热、传质方面存在很多种假说机制,包括细胞膜的电穿孔效应、电崩溃模型、电磁机制理论、粘弹性模型、电解产物理论、臭氧效应、电流体(电晕风)效应等^[19]。本文主要论述了其中四种较为公认的机制:一是生物细胞膜的电穿孔效应;二是电晕放电产生电流体;三是PEF激发形成等离子体;四是PEF处理下电极表面发生电化学反应和自由基激活。

2.1 电穿孔效应

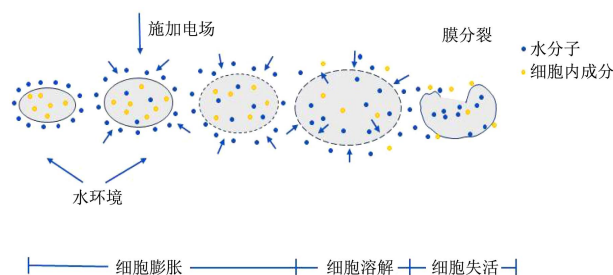


图2 脉冲电场作用下细胞膜穿孔模型机理示意图

Fig.2 The mechanism of membrane perforation model under pulsed applied electric field

“电穿孔效应”被认为是PEF处理导致微生物细胞失活的关键因素,同时在优化冰鲜食品冷冻工序、辅助萃取功效成分等方面发挥了重要作用。穿孔的形成主要可分为以下四个步骤:1)通过施加的外部电场产生跨膜电位差;2)在跨膜电位差产生后膜形成结构不稳定的亲水性小孔;3)在持续的电场处理过程中小孔逐渐变大,数量逐渐增加;4)细胞内化合物(核酸、功效成分等)经穿孔泄漏^[20]。穿孔的形成要求细胞膜内外存在足够的电位差,Weaver等^[21]指出形成穿孔所需的跨膜电位通常为 $0.5\sim 1.5\text{ V}$,这就要求电场必须达到一定的临界电场强度(如图2)^[10]。实现电穿孔所需的电场强度取决于几个因素,如食品的固有性质(固

态、液态,粘弹性,及介电特性)、电场处理参数(温度、脉冲处理时间、脉宽和脉冲数)、细胞属性(类型、大小、形状)和膜特性(离子强度、厚度和结构)等^[20]。在低 PEF 强度下,电穿孔通常是可逆的,可逆穿孔往往在电场消失后自主恢复,而要形成不可逆穿孔则需要更高强度的 PEF。不同的细胞形成不可逆穿孔所需的电场强度也不同,植物组织细胞形成不可逆穿孔大概需要 0.7~3 kV/cm,动物细胞大概需要 1~10 kV/cm,微生物细胞则需要 10~40 kV/cm^[9]。

2.2 电流体 (Electrohydrodynamic, EHD)

在高输入电压条件下,小曲率半径的电极尖端可以形成非均匀 PEF,从而在放电电极与地电极之间的间隙内实现电晕放电^[22]。当发生电晕放电时,放电电极周围产生电场感应流或电流体 (EHD),这是通过将动量从高速漂移离子转移到周围空气分子而产生的,当这一动量在间隙内积累到一定程度时便会引发“电子雪崩”,并将电子以“电晕风”的形式投射至位于接地电极的物料表面,这一过程依赖于电晕漂移区电场、离子和气体分子之间的相互作用(如图 3)^[23]。当电晕风到达物料表面时会增强物料传质与传热,从而达到促进干燥,加快冷冻与解冻的效果^[24]。EHD 的特点在于可以通过改变施加电压实现对传热和传质的快捷控制,且适用于不同的环境空间,虽然 EHD 理论上可以实现双相介质传质与传热性能的改变,但目前对于 EHD 的探索仍主要以单相介质为讨论对象^[25]。

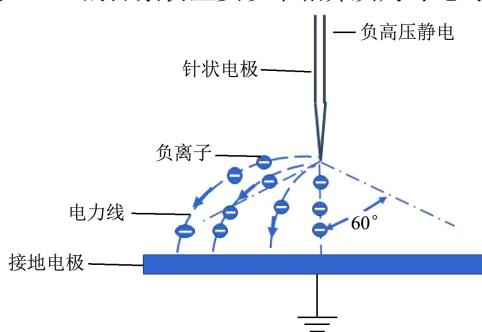


图 3 典型针-板电晕放电示意图

Fig.3 Typical needle-board corona discharge

2.3 等离子体 (Plasma)

高强度的 PEF 可以激发产生等离子体 (Plasma),等离子体由中性或亚中性电离气体形成,气体在高压度的能量场(高压脉冲电场)中发生解离,被电离的气体可以是空气、O₂、N₂或包含一定比例的稀有气体(Ar, He 或 Ne)的混合物,电离可在大气压和接近环境温度的条件下产生。虽然高压电场是最常见的激发场,但实际上光、热、辐射都可以对气体产生电离。

这些电离气体包括光子、自由电子、正负离子、处于基态或激发态的原子以及多种自由基,这些粒子结合起来具有灭活食品表面微生物的能力^[26]。利用等离子体的有效处理时间约为 3~300 s,食品的质构和化学组成、微生物种类、处理介质、细胞数量和生理状态、气体成分和气流量等是影响低温等离子体处理效果及处理时间的主要因素^[27]。各种研究表明,等离子体对革兰氏阴性和革兰氏阳性细菌、酵母菌和真菌以及通常很难灭活的孢子具有良好的抗菌活性^[28]。

2.4 电化学反应与自由基激活假说

在 PEF 处理过程中食品组分中生物大分子结构的改变通常可以用电化学反应与自由基激活假说解释^[29,30]。电极表面发生的电化学反应导致正负电极周围发生部分电解。当电极间介质存在水分子时,电解会产生 H⁺和 OH⁻,电解氧分子则会产生活性氧(ROS),包括超氧阴离子(O₂⁻)、单线态氧(¹O₂)、过氧化基团(H₂O₂)和臭氧(O₃),进一步暴露于 PEF 将促进 H₂O₂与 O₃进行反应生成羟自由基(·OH),当电极间介质为空气时,将电解产生 N₂⁺、O₂⁺、N⁺、O⁺和 O₂⁻离子^[23]。带电粒子如离子、蛋白质大分子和其他聚电解质会沿电场方向发生迁移,从而导致局部 pH 发生改变、引起生物大分子内部发生静电吸附,并引发大分子的构象变化^[31]。O₃被认为在杀菌和食品防腐领域是具有积极意义的,但值得注意的是 O₃、ROS 和其他自由基的存在也会引起食品组分中蛋白质的变性、脂质氧化以及青花素类物质的降解^[10,32]。通过缩短 PEF 处理时间或选择双极脉冲与短脉冲模式可以减少电化学反应的发生,直流电产生的电化学反应往往比 PEF 更弱^[33]。

3 脉冲电场在食品工业中的应用

脉冲电场在食品工业中的应用范围随着对其机制的不断深入了解而逐渐扩大,目前其应用主要集中在食品保鲜,辅助干燥,冷冻、解冻,提取等方面,同时 PEF 技术与其他技术的联合处理方法在食品工业上也不断的出现应用创新。在食品工业中,PEF 技术可有效的提高食品质量与食品的安全性,为食品行业的发展开辟了新途径。

3.1 食品保鲜

PEF 有潜力作为其他传统食品保鲜技术的替代品,在过去的几年里,一些研究已经证明了 PEF 处理可以获得安全且货架期稳定的液体食品^[13]。2006 年美国建立了第一个商业化应用的 PEF 系统用于果汁的保鲜,欧洲在 2010 年建立了应用 PEF 保鲜技术的果汁

生产线^[12]。目前 PEF 技术已被证实在牛奶^[34]、脱水水果干^[35]、果蔬汁^[36]、鲜果奶昔^[37]等食品的保鲜中表现出积极影响。引起食品腐败变质的因素很多,如微生物的增殖、食品内源酶的作用、食品组分的氧化酸败等,PEF 对食品的保鲜作用主要体现在其对微生物的杀伤效应以及酶活的抑制。

3.1.1 微生物灭活

一般来说,脉冲电场强度和脉冲数是影响灭菌效果最主要的因素。随着电场强度的增加,微生物的存活率迅速下降;而在相同的电场强度下,所施加的脉冲数越多杀菌效果越好。不同微生物对 PEF 的耐受性不同,革兰氏阴性菌比革兰氏阳性菌对高压脉冲电场更为敏感,无芽孢的细菌较有芽孢的细菌更容易被杀灭,而且体积越大的微生物对 PEF 越敏感^[38]。研究结果显示,PEF 处理对 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Salmonella Enteritidis*, *Listeria monocytogenes*, *Saccharomyces cerevisiae* 等均有明显的杀伤与抑制效果^[39]。

Cregezán-Alberti 等^[40]讨论了 PEF 处理对牛奶中 *E. coli*, *S.aureus*, *P. fluorescens* 的抑菌效果,结果发现在 32.5 °C 下 40 kV/cm 处理 *E. coli*, *S.aureus* 89 μ s, 42.5 kV/cm 处理 *P. fluorescens* 106 μ s 可分别导致约 5.0 log CFU/mL 的菌活下降。Tao 等^[41]的研究发现,在 35 kV/cm 脉冲电场下处理 90 s,酵母菌 (*S. cerevisiae*) 和大肠杆菌 (*E. coli*) 的数量分别减少了 5.30 和 5.15 个数量级。Delsart 等^[42]对比了脉冲电场处理 (PEF) 和高压放电 (HVED) 对葡萄酒的灭菌效果,结果发现 HVED 在 40 kV 电压下处理 10 ms 效果仍不如 20 kV/cm PEF 处理 4 ms,后者足以灭活葡萄酒中的所有 *O. oeni*, *P. parvulus*, *B. bruxellensis*, 而对葡萄酒的成分没有负面影响。李霜等^[43]探究了 PEF 对调理牛肉的杀菌效果,结果表明调理牛肉的 PEF 最佳处理参数为:脉冲频率 30.5 kHz、占空比 2.3%、处理时间 7 min、电场强度 45 kV/cm,此条件下 PEF 对调理牛肉中微生物致死率达到了 87.33%,调理牛肉的货架期延长了 2 d,且其感官品质无显著降低。

表 1 高压脉冲电场技术在微生物灭活中的应用汇总

Table 1 Summary of the application of high-voltage pulsed electric field technology in microbial inactivation

作用对象	处理方式	脉冲强度/(kV/cm)	频率/Hz	脉冲宽度/ μ s	结果	参考文献
生牛乳	PEF	20~42.5	200	10	<i>Pseudomonas fluorescens</i> 下降了 5.3 log ₁₀ (42.5 kV/cm 处理 106 μ s); <i>Escherichia Coli</i> 和 <i>Staphylococcus aureus</i> 分别下降了 5.0 和 5.2 log ₁₀ (42.5 kV/cm 处理 89 μ s)。	[40]
<i>Escherichia coli</i> <i>Saccharomyces cerevisiae</i> 菌悬液	PEF	20-35	-	-	<i>E. Coli</i> 和 <i>S. cerevisiae</i> 分别下降了 5.15 和 5.30 log (35 kV/cm 处理 90 μ s)。	[41]
种子	PEF	12	100~300	1.2	PEF 处理导致了八种种子中总需氧中温菌和总酵母、总霉菌存活率显著下降,且提高了种子的萌发率。	[46]
蓝莓	PEF+过乙酸	2	100	1	PEF 和过乙酸耦合处理 4 min 可引起 <i>E. coli</i> K12 和 <i>Listeria innocua</i> 减少超过 3 log, 以及全果中 2 log/g 的总菌数下降,且蓝莓样品表现出更佳的品质与营养价值。	[47]
红酒	PEF 和高压放电 (HVED)	20	0.5	10	PEF 处理和 HVED (40 kV) 处理 10 ms 可以有效灭活接种于红酒中的一种酵母菌以及三种乳酸菌,且 PEF 处理可以更好的保持红酒品质。	[42]
菠菜汁	PEF+超声 (US)	9	1 \times 10 ³	80	PEF-US 处理可以有效减少菠菜汁中菌落总数、肠杆菌、酵母和霉菌污染,且对矿物质、总游离氨基酸具有较好的保持作用。	[44]
酸樱桃汁	PEF+US+O ₃	24.7	500	3	PEF (655 μ s) 结合臭氧和 US 处理具有最佳的微生物灭活效果和农残去除率,且对酸樱桃汁的物理、生物活性和感官特性无不良影响。	[45]

表2 高压脉冲电场技术在抑制酶活中的应用汇总

Table 2 Summary of the application of high-voltage pulsed electric field technology in enzyme inactivation

作用对象	处理方式	脉冲强度 (kV/cm)	频率 /Hz	脉冲宽度 /μs	结果	参考文献
苹果汁	PEF	25、30、35	16	5	有效灭活苹果汁中多酚氧化酶活性，而对维生素 C、总酚、抗氧化能力与色泽具有良好保护效果。	[50]
果汁-豆浆饮料	PEF	35	200	4	高强度 PEF 处理使过氧化物酶和脂氧合酶活性分别下降了 17.5%~29%和 34%~39%，且样品表现出更佳的冷藏性能。	[51]
杏仁乳	PEF	7、14、21、28	1×10 ³	40	28 kV/cm 的 PEF 处理 200 μs 可以使杏仁乳中脂氧合酶和过氧化物酶活力减少 50%和 45%，且较热处理方法可以更好保持杏仁乳的品质。	[8]
苹果汁	PEF+热处理	20、30、40	15	1	将样品预热至 50℃后使用 40 kV/cm 的 PEF 处理 100 μs 可以使苹果汁中过氧化物酶和多酚氧化酶分别灭活 71%和 68%。	[52]
全脂牛奶	PEF+热处理	15.9~26.2	10~60	20	55℃预热 24 s 后使用 26.1 kV/cm 的 PEF 处理 34 μs 可以使全脂牛奶中血纤酶、黄嘌呤氧化酶、脂溶性脂肪活性降低 12%、32%、82%。	[53]
木瓜蛋白酶	PEF	10、13	0.2	-	13 kV/cm 的 PEF 处理 288 个脉冲数对 0.2 L/min 流量的木瓜蛋白酶可以造成 64% 的酶活下降以及 20%的巯基 (-SH) 破坏。	[54]
苹果汁	PEF+射频 (RF)	15、25、35	-	-	RF 预处理 10 min 可以使多酚氧化酶活性减少至 13.57%，而联合 PEF 处理后多酚氧化酶活力下降至 5%，且相较于传统热处理可以更好的保持新鲜样品的风味。	[55]

PEF 技术还可以与超声等方法协同使用，以提高灭菌效果延长食品货架期。Manzoor 等^[44]分析了超声处理 (US) 和脉冲电场 (PEF) 技术耦合效果，以提高菠菜汁的质量和微生物安全性，与单独使用 US 或 PEF 的处理相比，联合 (US-PEF) 后的菠菜汁具有更高的矿物质和总游离氨基酸含量，同时 US-PEF 处理显著降低了菠菜汁的总菌数 (3.83 至 1.97 log CFU/mL)，菠菜汁中的大肠菌群数从 1.90 log CFU/mL 下降至 0.75 log CFU/mL，酵母菌和霉菌从 4.23 log CFU/mL 下降至 2.22 log CFU/mL)。Akdemir 等人^[45]研究了 PEF、US 和 O₃ 对酸樱桃汁的联合处理，并对电场条件进行了优化，结果表明 24.7 kV/cm PEF 持续 655 μs 结合 US (35 kHz 处理 3 min) 和 O₃ (20.2 g/m³) 能够较优地实现农残消除和微生物灭活，在此条件下微生物灭活效果按以下顺序排列：*P. expansum* (4.38 log CFU/mL) > *P. syringae* (3.61 log CFU/mL) > *E. coli* O157:H7 (3.53 log CFU/mL) > *B. cereus* (1.94 log

CFU/mL)。

3.1.2 抑制酶活

酶的本质是一种具有生物活性与催化效率的蛋白质，大多数酶可视为球状结构，其活性位点埋在蛋白质分子的疏水性中心部位，其往往存在金属离子作为辅因子使酶发挥催化功能，氢键、非共价相互作用以及巯基和二硫键是稳固酶的二级与三级结构的主要分子间作用力。当暴露于 PEF 中时，在电场力的牵引下，酶二级结构、三级结构被破坏，蛋白质大分子展开并发生偏移和旋转，分子与分子间发生团聚，酶的构象发生改变，催化位点失效^[48,49]。Bi 等^[50]研究了 25、30、35 kV/cm 的 PEF 处理对苹果汁酶活性、维生素 C、总酚、抗氧化能力、色泽等性质的影响，上升沿为 0.2 μs 和 2 μs，结果发现 PEF 处理可以灭活多酚氧化酶 (PPO)，保持苹果汁的维生素 C、总酚含量、抗氧化能力和色泽，较短的上升沿可以更好的保持苹果汁的品质，但对于酶活的抑制也下降。Morales-de 等^[51]对

冷藏果汁豆浆饮料进行强脉冲电场处理,发现 PEF 处理后过氧化物酶 (POD) 活性下降了 17.5%~29%, 脂肪氧合酶活性下降了 34%~39%。Manzoor 等^[8]研究了 28 kV/cm PEF 处理 200 μ s 后杏仁乳的贮存性能,经 PEF 处理的样品脂肪氧合酶(LOX)和过氧化物酶(POD) 分别被灭活了 50%和 45%,且经过 28 d 的贮存后,PEF 处理的样品菌落总数与热处理组相当,而粒径、游离氨基酸、脂肪酸等物化指标要优于热处理组。PEF 处理结合适度的预热 (50 $^{\circ}$ C) 可使新鲜苹果汁中过氧化物酶 (POD) 和多酚氧化酶 (PPO) 的灭活水平达到 68%和 71%,明显高于常规的巴氏灭菌法 (72 $^{\circ}$ C; 26 s),且 POD 和 PPO 的残留活性随电场强度 (20、30、40 kV/cm) 和处理时间 (25、50、100 μ s) 的增加而

降低^[52]。

酶和微生物的活性关系到食品保鲜的效果, PEF 在食品保鲜上已经成功运用于流体食品如牛奶、果蔬汁、葡萄酒。在杀菌上, PEF 对流体食品中的 *Escherichia coli*、*Salmonella Typhimurium*、*Listeria monocytogenes* 和 *Staphylococcus aureus* 有积极的杀菌效果,然而 PEF 对于新鲜蔬菜、水果、肉制品以及海产品的杀菌研究很少,可能与 PEF 处理的形式以及它的穿透能力有关。在抑制酶活上,酶活性与食物来源、分子大小、微观结构和 PEF 处理条件有很大的关系,且目前的研究也多发生在液体产品中。因此,我们以期对 PEF 的机制进行深入的了解以扩大其对食品加工中的应用范围。

表 3 高压脉冲电场技术在食品辅助干燥中的应用汇总

Table 3 Summary of the application of PEF-assisted drying in food industry

作用对象	处理方式	脉冲强度/(kV/cm)	频率/Hz	脉冲宽度	结果	参考文献
菠菜	PEF+热风干燥	2.8	30	1 μ s	PEF 预处理有效提高了菠菜的干燥速率,且热风干燥好菠菜干的颜色更接近新鲜菠菜的颜色,对干样品中的维生素 C 降解未产生负面影响。	[62]
鸡肉	PEF+机械脱水+空气对流干燥	0.114	2	7 ms	80 $^{\circ}$ C 下 PEF 辅助鸡肉干燥最大有效扩散率为 2.31×10^{-9} m ² /s, PEF 与机械脱水相结合,可以使传统的肉类空气对流干燥中更加节能。	[63]
红甜椒	PEF+超声 (US)+冷冻干燥	1.07	-	40 ms	冷冻干燥前进行 PEF+US 预处理可减少干燥时间和能耗并且经 PEF 处理的样品的复水和吸湿性能分别提高了约 4.91~4.98 和 3.08~3.49 g H ₂ O/g 干物质。	[64]
草莓	PEF+冷冻干燥	1.07	2	40 μ s	PEF 预处理的草莓显示出更均匀的形状,更好的体积保持力和更好的感官品质,且导致空隙更大,分布更均匀,冻干后的色泽保留得更好。	[65]
胡萝卜	PEF+热风干燥	1.85、5	0.5	7 μ s	热风干燥前对胡萝卜样品进行 PEF 预处理,可以使干燥时间缩短 6.9%~8.2%,水扩散系数增加至 16.7%,且对于色泽具有良好的保护效果。	[57]
胡萝卜	PEF+真空干燥 (VD)	0.6	-	-	PEF 处理可以加速胡萝卜组织中水分的去除,在温度为 25 $^{\circ}$ C 和 90 $^{\circ}$ C 时,真空干燥时间分别减少了 55%和 33%	[59]
九种果蔬及两种海产品	PEF+热风干燥	0.5~3	1、30	1	热风干燥前的 PEF 预处理可以使野菜类蔬菜的干燥速率显著提高,而根茎类蔬菜没有显著变化。	[60]
红柿子椒	PEF+喷雾干燥	1.07	0.5	-	PEF 处理可以使新鲜红柿子椒汁中维生素 C、类胡萝卜素含量显著提高,且喷雾干燥后的粉末粒径更大。	[61]

3.2 辅助干燥

传统的热风干燥会对食品中的热敏性成分和风味物质产生负面影响,造成营养流失和品质劣变,区别于传统干燥技术,PEF通过“电晕风”作为驱动力,其在工作过程中不产生明显的升温效应,电流体(EHD)被认为是产生“电晕风”的主要原因,在高压电场作用下EHD产生大量高能电子与离子,这些高能粒子与其他气体分子不断碰撞,并产生大量的次级激发态物质,在电晕风的裹挟下自放电电极流向接地电极^[56],这些被激发的粒子所携带的能量作用在食品物料上,已被证明是加速食品脱水和解冻的主要原因^[10]。Wiktor等^[57]研究了PEF处理对胡萝卜干燥动力学及干燥后色泽和微观结构变化的影响,在5 kV/cm处理10个脉冲数后样品的干燥时间缩短了8.2%,水扩散系数提高到了16.7%,同时干燥后的样品保持了良好的色泽。Rahaman^[58]研究了PEF对李子干燥的对流干燥动力学发现随着PEF强度(1~3 kV/cm)的增加,崩解指数从0.147提高到0.572,缩短了干燥时间,与未处理样品相比,经过PEF预处理有效的改善了李子干的色泽。Liu等^[59]将胡萝卜进行PEF预处理(0.6 kV/cm; 0.1 s)后进行真空干燥动力学研究,发现PEF处理可以加速胡萝卜组织中水分的去除,在温度为25℃和90℃时,真空干燥时间分别减少了55%和33%。Yamada等^[60]将传统热风干燥与PEF处理(0.4~3 kV)结合,研究了PEF对9种水果蔬菜和2种海产品在热风干燥过程中干燥速率的变化,结果表明,PEF预处理后的叶菜类干燥速率提高了,而根茎类蔬菜干燥速度没有受到影响,这可能是由于细胞组织的物理特性不同造成的。Rybak等^[61]对PEF处理后的甜椒汁及甜椒汁喷雾干粉进行评估,结果发现PEF处理后可以提高极性(Vc)和非极性(类胡萝卜素)生物活性物质的含量,但是过高的PEF能量输入又会导致这些生物活性物质的降解。

综上所述,PEF已经用于各种干燥过程中的预处理,如热风干燥、空气对流干燥、真空干燥、冷冻干燥、喷雾干燥等,在对生物活性物质的保留上,PEF预处理尚未发现明显的趋势;在颜色保持上,PEF预处理样品通常能够更好的保持样品原有的色泽,但这也取决于食品的结构和加工条件;在质地上,温度的影响通常大于PEF对其的影响。

3.3 辅助冷冻/解冻

在冻结过程中,随着温度降低液态水进入过冷状态,当发生初始冻结时冰核突然生成,此后,以冰核

为核心冰晶开始生长^[66],冰晶的形成对冷冻食品的质量起着至关重要的作用,冰晶体积过大可能会对组织造成不可逆的损伤,导致解冻时汁液损失增加。PEF主要作用于过冷阶段和初始冻结的发生,PEF的应用可以改变过冷阶段的吉布斯自由能(ΔG_0)的改变,从而影响冰核的形成^[10]。当引入电场时,过冷状态下的液态水吉布斯自由能(ΔG_0)变化水平可用以下公式(1)描述^[67]:

$$\Delta G_0 = 4\pi r^2 \gamma - \frac{4}{3}\pi r^3 (\Delta G_v + PE) \quad (1)$$

式中:

ΔG_0 ——吉布斯自由能的变化;

r ——液滴球面的半径;

γ ——流体界面的表面自由能;

ΔG_v ——液滴体积自由能;

P ——系统极化强度;

E ——外加电场电场强度。

在电场的作用下,结晶过程更加可控,水分子的极化和重新排列使冰晶的形成更加均匀和细小,同时与常规冷冻技术相比,电场辅助冷冻所需的能量更低^[68]。Li等^[69]研究了PEF处理对大西洋鲑鱼冷冻及解冻品质的影响,1 kV/cm的PEF被持续施加在10.0±1.5 g的新鲜鱼块上,同时在-18℃进行冷冻,在10℃进行解冻,结果表明,施加PEF后,从-2℃到0℃的解冻时间缩短了20 min,尽管在色度上表现出一定程度的劣变,但PEF处理组解冻后的样品肌肉纤维保存更好,质量总损失降低了6%,表现出更好的贮藏新鲜度。Wiktor等^[7]使用9种不同参数的PEF对新鲜苹果组织进行预处理,并用乙醇作为冷冻剂考察苹果组织的冻融性能,结果指出PEF预处理可使冷冻时间缩短3.5%~17.2%,冷冻相变阶段缩短33%,解冻时间缩短了71.5%,然而在冷冻前PEF处理的样品均表现出不同程度的汁液损失,5 kV/cm处理50个脉冲数时汁液损失率达到了(8.9%),这可能是电穿孔引起胞内物质溶出导致的。Ammar等^[70]将高渗溶液处理和PEF处理(0.4 kV/cm)结合讨论其对马铃薯组织的冷冻性能影响,结果发现单纯PEF处理对马铃薯感官质量无明显影响,而NaCl腌渍和PEF联合处理后马铃薯组织表面形成了更多的粗糙颗粒,高渗处理和PEF联合处理使马铃薯组织获得了最高的冷冻速率和脱水速率。一种创新的将PEF(1.78 V/cm)和静磁场(SMF)结合的冻结技术也被报道^[71],其结果表明,单纯PEF处理在频率为20 kHz时可使0.9% NaCl溶液具有最短相变时间(1443±2 s),而将PEF与SMF结合的处理方法可以使相变时间缩短至1004±3 s,且产生的冰晶

尺寸更小,表现出更高的冷冻效率。

这些结果表明,PEF在辅助冷冻/解冻上有巨大的潜力,避免了传统加工方法造成的一些问题,如速度慢、滴水损失高、能耗高等,但PEF也会引发一些高脂质食品的脂质的氧化以及颜色的变化等不良的效

果。同时,PEF在辅助解冻中会形成“电晕风”,明显的加快食品的干燥,可能会造成食品产生异味以及变质。因此,我们在利用PEF的同时需要考虑对食品本身的影响,针对不同食品不断优化最佳PEF的工艺参数。

表4 高压脉冲电场技术在食品辅助冷冻/解冻中的应用汇总

Table 4 Summary of the application of PEF-assisted freezing/thawing in food industry

作用对象	处理方式	脉冲强度/(kV/cm)	频率/Hz	脉冲宽度/ μ s	结果	参考文献
大西洋鲑鱼	PEF	0.5、1、1.5	50	200	施加 PEF 后,从-2 °C到 0 °C的解冻时间缩短了 20 min, PEF 处理组解冻后的样品肌肉纤维保存更好,质量总损失降低了 6%,表现出更好的贮藏新鲜度。	[72]
苹果	PEF	1.85、3、5	-	15、20、24	PEF 预处理可使冷冻时间缩短 3.5%~17.2%,冷冻相变阶段缩短 33%,解冻时间缩短了 71.5%。	[7]
马铃薯	PEF+高渗	0.4	500	100	单纯 PEF 处理对马铃薯感官质量无明显影响,而高渗处理和 PEF 联合处理使马铃薯组织获得了最高的冷冻速率。	[73]
马铃薯	PEF+真空干燥 (VD)	0.6	-	100	PEF 处理可显著加快 VD 的发生,同时 PEF 处理与 VD 结合使用可以明显加快冷冻过程且冻融后质地得到了改善。	[74]
草莓	PEF+真空浸液 (VI)	0.85	-	100	在 VI 之前用 PEF 预处理的草莓在融化后的草莓中具有较高的细胞活力,并具有显着更好的内部果肉保色性,红色保留率增加了 30%,表现出更好的耐冻性。	[75]
苹果	PEF+渗透脱水 (OD)	0.8	-	100	PEF 预处理可以使对苹果的渗透脱水更加有效,且 PEF 辅助渗透脱水后的苹果组织冻融速度更快,解冻后的苹果组织质地更加紧实。	[76]
胡萝卜	PEF	1	4	25	PEF 处理可以使解冻后的胡萝卜样品具有更高的硬度,且可以对色度可以起到良好的保护作用。	[77]

3.4 辅助提取

传统的提取技术效率低,成本高昂且溶剂选择困难,近年来,一些新的提取方法,如脉冲电场,高压放电,脉冲欧姆加热,超声波,微波萃取,亚临界和超临界流体萃取等已被提出作为提取高附加值产物的替代方法^[23]。PEF处理可以导致电穿孔,使细胞膜结构发生破坏,从而导致胞内物质溶出^[78]。此外,PEF增强传质以及极化生物大分子的能力也可能是其提高提取效率的重要原理。PEF已被用于改善水果和蔬菜中细胞内化合物的提取,可有效的增加其多酚类、黄酮类、以及色素等的提取,并且可以有效的增加提取物的抗氧化活性。李圣桡等^[79]优化了PEF辅助提取蓝

靛果中花青素的工艺确定了当乙醇体积分数 67%,电场强度 20 kV/cm,脉冲数 10 个,液料比 1:78 g/mL,此时花青素提取量最佳为 34.20 mg/g,且与传统工艺进行了对比发现 PEF 辅助提取时具有溶剂消耗少、提取时间短、花青素提取量多的优势。Dastangoo 等^[80]利用 PEF 对胡萝卜进行糖的提取并对 PEF 处理条件进行了优化,结果发现在 70 °C 下 0.75 kV/cm PEF 处理 255 min 可以达到最大糖提取率,此时提取率为 74.61%。El Kantar 等^[81]研究了 PEF 对柑橘类水果(橙子、柚子和柠檬)多酚提取效率的影响,全果和果皮分别用 3 kV/cm 和 10 kV/cm 的 PEF 进行处理,通过 PEF 处理橙汁、柚子汁和柠檬汁的出汁率分别提高了 25%、37%和 59%,结合 50%乙醇进行协同提取,全

果和果皮中多酚的提取率较空白组均有提高。Martín-García 等^[82]以 PEF 作为预处理手段期望改善啤酒酿造废渣酚类化合物的回收率, 实验表明使用 2.5 kV/cm, 50 Hz 的 PEF 处理 14.5 s 可以将游离酚和结合酚的总回收率分别提高 2.7 和 1.7 倍。Pataro 等^[83]的研究结果表明, 在用丙酮或乳酸乙酯进行溶剂萃取之前, 采用中等强度 (5 kV/cm; 5 kJ/kg) PEF 预处理可提高工业番茄副产物中类胡萝卜素 (尤其是番茄红素) 的产率, PEF 预处理后样品萃取率提高了 27%~37%, 番茄红素回收率提高了 12%~18%, 抗氧化能力提高了 18.0%~18.2%。Shorstkii 等^[84]对葵花籽施加了 7 kV/cm 的 PEF (6.1 kJ/kg) 使葵花籽油的提取率提高了 2.3%, 且样品表现出更优的萃取参数, PEF 处理后萃取的葵

花籽油在酸价、过氧化值、色度指标上表现出较小的影响, 多酚与生育酚含量增加。

综上所述, PEF 作为一种辅助提取的手段已经显示出较传统提取方法的优势和潜力, 但是由于 PEF 提取的有效性主要取决于细胞膜的通透性, 所以单一的 PEF 处理应用范围比较狭窄, 主要用于提取水溶性成分或不需要分离纯化的混合物且所需的电场强度较高, 相较而言, PEF 辅助溶剂的提取可使 PEF 的强度以及溶剂的用量得到明显的降低, 但在辅助溶剂提取中也不可避免的会造成溶剂的残留和污染, 所以, 我们可以接下来可以探究 PEF 与其他提取方法如酶法提取相结合, 可能是一个有效的解决方法。

表 5 高压脉冲电场技术在食品辅助提取中的应用汇总

Table 3 Summary of the application of PEF-assisted extracting in food industry

作用对象	处理方式	脉冲强度/(kV/cm)	频率/Hz	脉冲宽度	结果	参考文献
胡萝卜	PEF+热处理	0.25、0.75、1.25	1	-	45 °C 下与 0.75 kV/cm 的 PEF 联合处理 10 个脉冲数可以对胡萝卜样品获得最佳的糖提取效率。	[80]
桔子、柚子、柠檬	PEF	3、10	-	2 s	3 kV/cm 的 PEF 处理显著提高了全果压榨果汁中多酚的含量; 10 kV/cm 的 PEF 处理显著增加了桔皮中多酚的提取率 (从 16 mg/g DM 增加至 22 mg/g DM)。	[81]
啤酒渣	PEF	0.5、1.5、2.5	50、100、150	10 μs	2.5 kV/cm, 50 Hz 的 PEF 处理 14.5 s 可以将啤酒渣中游离酚和结合酚的总回收率分别提高 2.7 和 1.7 倍。	[82]
番茄加工副产物	PEF	1、3、5	10	20 μs	在溶液萃取前对样品进行中等强度 PEF (5 kV/cm) 预处理可以显著提高样品提取率 (27%~37%)、番茄红素产率 (12%~18%) 和抗氧化能力 (18.0%~18.2%)。	[83]
葵花籽	PEF	4~8	30	30 μs	7 kV/cm 的 PEF (6.1 kJ/kg) 预处理 2.5 s 可以将葵花籽油的提取率提高 2.3%, 且相较于对照具有更好的萃取参数。	[84]
紫球藻	PEF	2~10	0.5	3 μs	8 kV/cm、10 kV/cm 的 PEF 处理 150 μs 可以显著提高紫球藻 24 h 内 β-藻红蛋白总提取量。	[85]
微拟球藻	PEF	20	0.5	2 s	PEF 处理可以在初步提取工艺中提高蛋白质提取效率, 且蛋白质降解量更少; 二次提取中对色素的提取显著增强。	[86]

3.5 辅助嫩化

肉的嫩度很大程度上依赖于肌肉细胞的完整性, PEF 技术作为一种环境友好型物理手段, 在对肌肉细胞进行温和破壁的同时尽可能的避免了氧化、异味、

肌肉组织的结构改变, 这赋予了 PEF 技术在辅助嫩化肉质领域巨大的应用潜力^[12]。肌钙蛋白-T 和肌间线蛋白是维持肌肉细胞结构稳定性重要蛋白组分, 多种研究表明 PEF 处理后的牛肉在老化过程中肌钙蛋白-T 和肌间线蛋白的水解度增加^[87-89], 这一结果同时伴随

着牛肉样品嫩度、剪切性能的改善。PEF 处理会导致溶酶体破裂从而释放组织蛋白酶, PEF 处理同样会导致 Ca^{2+} 离子的释放从而激活 Ca^{2+} 依赖蛋白酶、促进糖酵解, 这是 PEF 促进肉品嫩化的重要机制^[90]。PEF 辅助嫩化的效果主要由电场强度、肉的种类以及肉的老化时间决定。Kantono 等^[91]研究了 PEF 处理后牛肉理化性能与感官性状的变化, 对新鲜牛肉样品和解冻的牛肉样品分别施加 0.8~1.1 kV/cm 的 PEF (能量输出为 130 kJ/kg), 脉宽为 20 μs , 频率为 50 Hz, 尽管 PEF 处理后的样品都表现出脂质氧化水平的提高以及短链脂肪酸的增加, 但牛肉样品在嫩度与颜色的改善上表现出优异的结果, 肉样的感官形状得到了改善, 表现得更加多汁。然而另一项研究指出, PEF 处理对于改善鹿肉的嫩度并没有显著效果, 在此研究中讨论了 0.2 kV/cm、0.5 kV/cm 两种 PEF 强度, 总能量输入分别为 1.93 kJ/kg 和 70.2 kJ/kg, 与空白对照相比 PEF 处理后样品剪切力和肌原纤维碎片化指数并明显变化, 虽然肌钙蛋白-T 和肌间线蛋白活性略有增加, 伴随蛋白水解度上升预示 PEF 具有提高产品嫩度的趋势, 但从酪蛋白酶谱分析、Western blotting 和肌原纤维蛋白的改变程度上看, PEF 处理对于改善鹿肉嫩度并无明显作用, 但这可能是因为电场强度过低导致的, 且鹿肉肌肉纤维区别于牛肉等传统肉品, 这可能赋予了鹿肉对于 PEF 更高的抗性。另一项将 PEF 用于鹿肉处理的研究指出^[92], 10 kV 50 Hz 的 PEF 处理可以使鹿肉的嫩度提高约 9%, PEF 处理改变了鹿肉的微观结构, 加速了传质, 使产品的干燥效率也得到了改善, 同时 PEF 处理后的鹿肉具有更高的食用质量。

PEF 辅助肉的嫩化首先通过电穿孔改变肉的微观结构, 促进 Ca^{2+} 离子的释放, 随后钙蛋白酶被激活导致老化过程中的蛋白水解和肉的嫩化, 除此之外, 我们缺乏对肉中的一些其他代谢途径的研究以进一步解释肉嫩化的机制。同时, PEF 辅助嫩化过程中会不可避免的造成脂肪氧化水平的提高从而影响肉制品的营养以及感官且肉制品的种类不同也对 PEF 施加的条件产生影响, 因此, 我们需要根据不同的肉制品以及发生的不良反应来优化最佳的电场条件以实现肉制品更好的嫩化。

3.6 其他应用

除了上述应用, PEF 处理在辅助压榨、油炸、酒的催陈、淀粉及蛋白质改性^[93]等领域也具有广泛的应用前景。Eshtiaghi 等^[94]研究了 PEF 技术在甜菜压榨处理中的应用, 结果发现使用 1.2~2.5 kV/cm 的 PEF 处理 1~100 个脉冲数对于压榨工艺具有关键作用, PEF

处理后的甜菜具有更高的压榨效率, 压榨后残渣干物质含量为 37%, 明显高于传统压榨处理的甜菜样品 (15%), 且 PEF 处理后残渣中残糖更少, 能耗也更低。Genovese 等^[95]发现, 相较于传统焯水处理 PEF 处理过的油炸马铃薯片丙烯酰胺含量比未经处理的马铃薯片低约 30%, PEF 可通过促进丙烯酰胺前体物质的析出, 从而抑制油炸过程中有毒化合物的形成, 而仅仅在颜色和质地上表现出轻微的品质降低。郑志超等^[96]以玫瑰葡萄为试验材料, 探究了在 36 个指数衰减波下, 不同电场强度在浸渍过程中对葡萄汁品质的影响, 结果表明 PEF 处理可提高发酵汁中黄酮, 单宁、总花色苷含量且降低了葡萄酒中的甲醇、挥发酸含量。在 2 kV/cm 处理条件下, 葡萄酒中干浸出物含量为最高值 23.37 g/L, 且感官指标为最佳。Xu 等^[97]对枣浆进行 PEF 预处理, 并对其对发酵动力学、组分和感官特性进行了研究和比较, 结果发现 1.5 kV/cm, 1 Hz, 10 个指数脉冲的 PEF 处理可以提高枣浆发酵后酚类化合物的提取率, 尤其是咖啡因、类胡萝卜素和对羟基苯甲酸, 花果香气的挥发性物质含量增加, 而杂醇类化合物下降, 这预示着 PEF 处理在葡萄酒酿造行业是一种极具前景的先进技术。余雅倩等^[98]利用 PEF 协同酶解制备多孔淀粉, 发现通过 PEF 改性后的淀粉的水解率得到显著提高且达到相同水解率 24.28%的酶解时间缩短一半, 并且改性后的多孔淀粉其吸油率、比表面积和总孔容与原淀粉相比分别提高到了 145.11%、1.25 m^2/g 、4.31 $\text{cm}^2/\text{g} \times 10^{-3}$, 为高效制备多孔淀粉提供了一个新思路。

4 结论与展望

4.1 从食品加工的适用性角度来看, PEF 技术既能够单独使用, 在食品保存、干燥、冷冻、萃取等方面都有良好的应用, 将其与其他加工技术相结合可以表现出更广泛的适用性与更佳的处理效率, 从而展现出更加广阔的发展应用前景。尽管如此, 目前 PEF 技术的大多数研究只是处于实验室阶段, 在大规模生产方面仍有一些瓶颈有待解决, 开发具有稳定工业规模的高强度 PEF 设备仍然是一项艰巨的任务。

4.2 首先, 高功率高压脉冲电源的开发是重点, 这是确保产生高强度电场从而适应大规模工业生产的基本保障; 其次, 针对不同类型的食品基质设计合理的 PEF 处理室, 探索最佳的工艺参数对获得最佳的电场处理效率至关重要; 此外, 电极/介质界面上的电化学反应往往会导致电极腐蚀以及电极材料向食品系统的迁移, 这需要开发出更合适或更耐用的材料来代替常用的不锈钢电极。最后, 作为一门交叉学科, PEF 技术

的发展需要多学科领域的共同参与,在多领域学者的共同努力下未来PEF系统在食品工业中的应用将具有广阔的发展前景。

参考文献

- [1] Wibowo S, Essel E A, De Man S, et al. Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 54: 64-77
- [2] 杨宇帆,陈倩,王浩,等. 高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 316-320, 325
YANG Yufan, CHEN Qian, WANG Hao, et al. Research progress of high voltage electric field technology in food processing [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 316-320, 325
- [3] Zhang Z, Zhang B, Yang R, et al. Recent developments in the preservation of raw fresh food by pulsed electric field [J]. *Food Reviews International*, 2020: 1-19
- [4] Galván-D'alessandro, Leandro, Carciochi, et al. Fermentation assisted by pulsed electric field and ultrasound: a review [J]. *Fermentation*, 2018, 4(1): 1-12
- [5] 李晓娟. 脉冲电场在天然产物提取中的应用研究[J]. *现代食品*, 2020, 17: 108-113
LI Xiaojuan. Application research of pulsed electric field in natural product extraction [J]. *Modern Food*, 2020, 17: 108-113
- [6] 唐德龙,白亚乡. 高压脉冲电场干燥预处理技术综述[J]. *当代农机*, 2021, 1: 53-55
TANG Delong, BAI Yaxiang. High-voltage pulsed electric field drying pretreatment technology: a review [J]. *Modern Agricultural Machinery*, 2021, 1: 53-55
- [7] Wiktor A, Schulz M, Voigt E, et al. The effect of pulsed electric field treatment on immersion freezing, thawing and selected properties of apple tissue [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146(2): 8-16
- [8] Manzoor M F, Zeng X A, Ahmad N, et al. Effect of pulsed electric field and thermal treatments on the bioactive compounds, enzymes, microbial, and physical stability of almond milk during storage [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(7): 1-14
- [9] Nowosad K, Sujka M, Pankiewicz U, et al. The application of PEF technology in food processing and human nutrition [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(2): 397-411
- [10] Wang Q, Li Y, Sun D W, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: principles and applications [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(13): 2285-2298
- [11] Maged E A, Eiss A H A. *Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology* [M]. IntechOpen, 2012
- [12] Bhat Z F, Morton J D, Mason S L, et al. Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(10): 1660-1674
- [13] Soliva F R, Balasa A, Knorr D, et al. Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: a review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2009, 20(11-12): 544-556
- [14] Ho S, Mittal G S J F R I. High voltage pulsed electrical field liquid food pasteurization [J]. *Food Reviews International*, 2000, 16(4): 395-434
- [15] Okada S, Nakamura K, Sakamoto K, et al. The effect of needle tips interval distance in ozone generation using triple needle-plane electrodes [J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2020, 15(5): 646-651
- [16] Toepfl S, Heinz V, Knorr D. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2007, 46(6): 537-546
- [17] Fiala A, Wouters P C, Bosch E V D, et al. Coupled electrical-fluid model of pulsed electric field treatment in a model food system [J]. *Innovative of Food Science & Emerging Technologies*, 2001, 2(4): 229-238
- [18] Gerlach D, Alleborn N, Baars A, et al. Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: a review [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 408-417
- [19] 励建荣,夏道宗. 高压脉冲电场与脉冲强光灭菌技术的研究[J]. *食品研究与开发*, 2002, 5: 71-72
LI Jianrong, XIA Daozong. Study on high voltage pulsed electric field and pulsed bright light sterilization technology [J]. *Food Research and Development*, 2002, 5: 71-72
- [20] Saulis G. Electroporation of cell membranes: the fundamental effects of pulsed electric fields in food processing [J]. *Food Engineering Reviews*, 2010, 2(2): 52-73
- [21] Weaver J C. Electroporation of cells and tissues [J]. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(1): 24-33
- [22] Janda M, Joshi R P, Krasnoperov L, et al. *Electrical Discharges* [M]. American Cancer Society, 2017
- [23] Dalvi I M, Hamdami N, Le B A, et al. The principles of high

- voltage electric field and its application in food processing: a review [J]. Food Research International, 2016, 89(1): 48-62
- [24] Martynenko A, Kudra T. Electrically-induced transport phenomena in EHD drying - a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 54: 63-73
- [25] Dinani S T, Hayet M. Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 70: 417-426
- [26] Pankaj S K, Bueno F C, Misra N N, et al. Applications of cold plasma technology in food packaging [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 35(1): 5-17
- [27] Ziuzina D, Patil S, Cullen P J, et al. Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica serovar Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* inoculated on fresh produce [J]. Food Microbiol, 2014, 42(9): 109-116
- [28] Montie T C, Kelly W K, Roth J R. An overview of research using the one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) for sterilization of surfaces and materials [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 28(1): 41-50
- [29] Rodrigues R M, Martins A J, Ramos O L, et al. Influence of moderate electric fields on gelation of whey protein isolate [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 329-339
- [30] Ma S, Yu S J, Zhang B, et al. Physicochemical properties of sugar beet pulp pectin by pulsed electric field treatment [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(12): 2538-2544
- [31] Li Y, Chen Z, Mo H. Effects of pulsed electric fields on physicochemical properties of soybean protein isolates [J]. Food Science Technology, 2007, 40(7): 1167-1175
- [32] Zhao Y Q, Yang S L, Yang X Q, et al. Effects of ozonated water treatment on physico-chemical, microbiological and sensory characteristics changes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during storage in ice [J]. Ozone-Science & Engineering, 2020, 42(5): 408-419
- [33] Giteru S G, Oey I, Ali M A. Feasibility of using pulsed electric fields to modify biomacromolecules: a review [J]. Trends in Food Science Technology, 2017, 72: 91-113
- [34] 吴志东,高安平,任彩霞,等.非热杀菌技术在乳制品加工中的应用研究进展[J].中国乳业,2021,1:53-55
WU Zhidong, GAO Anping, REN Caixia, et al. Talking about the research progress on nonthermal sterilization technology in dairy products processing [J]. China Dairy, 2021, 1: 53-55
- [35] Dermesonlouglou E, Zachariou I, Andreou V, et al. Quality assessment and shelf life modeling of pulsed electric field pretreated osmodehydrofrozen kiwifruit slices [J]. International Journal of Food Studies, 2018, 7(1): 34-51
- [36] 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
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
- [37] Timmermans R A, Nederhoff A L, Nierop Groot M N, 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]. Int J Food Microbiol, 2016, 230: 21-30
- [38] Álvarez I, Condón S, Raso J. Microbial Inactivation by Pulsed Electric Fields [M]. Springer US, 2006
- [39] Wang M S, Wang L H, Bekhit A E A, et al. A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 32-41
- [40] Cregenzán A O, Halpin R M, Whyte P, et al. Study of the suitability of the central composite design to predict the inactivation kinetics by pulsed electric fields (PEF) in *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas fluorescens* in milk [J]. Food Bioprocess Technology, 2015, 95: 313-322
- [41] Tao X Y, Chen J, Li L N, et al. Influence of pulsed electric field on *Escherichia coli* and *cerevisiae* [J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(7): 1416-1427
- [42] Delsart C, Grimi N, Boussetta N, et al. Impact of pulsed-electric field and high-voltage electrical discharges on red wine microbial stabilization and quality characteristics [J]. Journal of Applied Microbiology, 2016, 120(1): 152-164
- [43] 李霜,李诚,陈安均,等.高压脉冲电场对调理牛肉杀菌效果的研究[J].核农学报,2019,33(4):722-731
LI Shuang, LI Cheng, CHEN Anjun, et al. Sterilizing effect of high-voltage pulsed electric fields on prepared beef [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2019, 33(4): 722-731
- [44] Manzoor M F, Ahmed Z, Ahmad N, et al. Novel processing techniques and spinach juice: quality and safety improvements [J]. J Food Sci, 2020, 85(4): 1018-1026
- [45] Akdemir E G, Keskin E, Golge O. Interaction and multi-objective effects of multiple non-thermal treatments of sour cherry juice: pesticide removal, microbial inactivation, and quality preservation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(4): 1653-1661
- [46] Gulsun A, Evrendilek, Berna, et al. Design and effectiveness

- of pulsed electric fields towards seed disinfection [J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 2019, 99(7): 3475-3480
- [47] Jin T Z, Yu Y, Gurtler J B. Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 77: 517-524
- [48] Terefe N S, Buckow R, Versteeg C. Quality-related enzymes in plant-based products: effects of novel food processing technologies part 2: pulsed electric field processing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(1): 1-15
- [49] Samaranyake C P, Sastry S K. Effect of moderate electric fields on inactivation kinetics of pectin methylesterase in tomatoes: the roles of electric field strength and temperature [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 186(10): 17-26
- [50] Bi X F, Liu F X, Rao L, et al. Effects of electric field strength and pulse rise time on physicochemical and sensory properties of apple juice by pulsed electric field [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 85-92
- [51] Morales D L P M, 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]. Lwt - Food Science and Technology, 2010, 43(6): 872-881
- [52] 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 Chem, 2008, 109(2): 402-407
- [53] Sharma P, Oey I, Bremer P, et al. Reduction of bacterial counts and inactivation of enzymes in bovine whole milk using pulsed electric fields [J]. International Dairy Journal, 2014, 39(1): 146-156
- [54] María M, Pokhrel P R, René R, et al. Effect of pulsed electric fields on the activity of food-grade papain in a continuous system [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 109: 336-341
- [55] Tian Y X, Wang S K, Yan W X, et al. Inactivation of apple (*Malus domestica* Borkh) polyphenol oxidases by radio frequency combined with pulsed electric field treatment [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2018, 53(9): 2054-2063
- [56] Bai Y X, Qu M, Luan Z Q, et al. Electrohydrodynamic drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2013, 54(2): 570-576
- [57] Wiktor A, Nowacka M, Dadan M, et al. The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot [J]. Drying Technology, 2015, 34(11): 1286-1296
- [58] Rahaman A. 非热处理工艺对李子干燥动力学及营养品质的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2020
- Rahaman A. Impact of nonthermal technology on drying kinetics and nutritive quality of plum [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020
- [59] Liu C, Pirozzi A, Ferrari G, et al. Impact of pulsed electric fields on vacuum drying kinetics and physicochemical properties of carrot [J]. Food Research International, 2020, 137: 109658
- [60] Yamada T, Yamakage K, Takahashi K, et al. Influence of drying rate on hot air drying processing of fresh foods using pulsed electric field [J]. Ieej Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(7): 1123-1125
- [61] Rybak K, Samborska K, Jedlinska A, et al. The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102446
- [62] Yamakage K, Yamada T, Takahashi K, et al. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 68: 102615
- [63] Ghosh S, Gillis A, Levkov K, et al. Saving energy on meat air convection drying with pulsed electric field coupled to mechanical press water removal [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102506
- [64] Rybak K, Pamiakov O, Samborska K, et al. Energy and quality aspects of freeze-drying preceded by traditional and novel pre-treatment methods as exemplified by red bell pepper [J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1-15
- [65] Lammerskitten A, Wiktor A, Mykhailiyk V, et al. Pulsed electric field pre-treatment improves microstructure and crunchiness of freeze-dried plant materials: case of strawberry [J]. Lwt, 2020, 134: 11026
- [66] Wei S, Xiaobin X, Hong Z, et al. Effects of dipole polarization of water molecules on ice formation under an electrostatic field [J]. Cryobiology, 2008, 56(1): 93-99
- [67] Marand H L, Stein R S, Stack G M J J O P E P B P P. Isothermal crystallization of poly (vinylidene fluoride) in the presence of high static electric fields. I. Primary nucleation phenomenon [J]. Journal of Polymer Science, 1988, 26(7): 1361-1383

- [68] Xanthakis E, Havet M, Chevallier S, et al. Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20(10): 115-120
- [69] Li J H, Shi J Y, Huang X W, et al. Effects of pulsed electric field on freeze-thaw quality of Atlantic salmon [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65: 102454
- [70] Ammar J B, Lanoiselle J L, Lebovka N I, et al. Effect of a pulsed electric field and osmotic treatment on freezing of potato tissue [J]. *Food Biophysics*, 2010, 5(3): 247-254
- [71] Mok J H, Choi W, Park S H, et al. Emerging pulsed electric field (PEF) and static magnetic field (SMF) combination technology for food freezing [J]. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 2015, 50: 137-145
- [72] Li J, Shi J, Huang X, et al. Effects of pulsed electric field on freeze-thaw quality of Atlantic salmon [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65: 102454
- [73] Ben A J, Lanoiselle J L, Lebovka N I, et al. Effect of a pulsed electric field and osmotic treatment on freezing of potato tissue [J]. *Food Biophysics*, 2010, 5(3): 247-254
- [74] Liu C, Grimi N, Bals O, et al. Effects of pulsed electric fields and preliminary vacuum drying on freezing assisted processes in potato tissue [J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2021, 125: 126-133
- [75] Velickova E, Tylewicz U, Dalla R M, et al. Effect of pulsed electric field coupled with vacuum infusion on quality parameters of frozen/thawed strawberries [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 233: 57-64
- [76] Parniakov O, Bals O, Lebovka N, et al. Effects of pulsed electric fields assisted osmotic dehydration on freezing-thawing and texture of apple tissue [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 183: 32-38
- [77] Shayanfar S, Chauhan O P, Toepfl S, et al. Pulsed electric field treatment prior to freezing carrot discs significantly maintains their initial quality parameters after thawing [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2014, 49(4): 1224-1230
- [78] Rosello S E, Koubaa M, Moubarik A, et al. Emerging opportunities for the effective valorization of wastes and by-products generated during olive oil production process: non-conventional methods for the recovery of high-added value compounds [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 45(2): 296-310
- [79] 李圣桡,李若萌,陈博朴,等.高压脉冲电场辅助提取蓝靛果花青素工艺优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3242-3250
- LI Shengrao, LI Ruomeng, CHEN Bopu, et al. Optimization of high voltage pulsed electric field assisted extraction of *Lonicera edulis* anthocyanin [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(8): 3242-3250
- [80] Dastangoo S, Mosavian M T H, Yeganehzad S. Optimization of pulsed electric field conditions for sugar extraction from carrots [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(4): 2025-2034
- [81] El K S, Boussetta N, Lebovka N, et al. Pulsed electric field treatment of citrus fruits: improvement of juice and polyphenols extraction [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 46: 153-161
- [82] Martin G B, Tylewicz U, Verardo V, et al. Pulsed electric field (PEF) as pre-treatment to improve the phenolic compounds recovery from brewers' spent grains [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 64: 102402
- [83] Pataroa G, Carulloa D, Falconeb M, et al. Recovery of lycopene from industrially derived tomato processing by-products by pulsed electric fields-assisted extraction [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 63: 102369
- [84] Shorstkii I, Khudyakov D, Mirshekarloo M S. Pulsed electric field assisted sunflower oil pilot production: impact on oil yield, extraction kinetics and chemical parameters [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102309
- [85] Martínez J M, Delso C, Álvarez I, et al. Pulsed electric field permeabilization and extraction of phycoerythrin from *Porphyridium cruentum* [J]. *Algal Research*, 2019, 37: 51-56
- [86] Parniakov O, Barba F J, Grimi N, et al. Pulsed electric field assisted extraction of nutritionally valuable compounds from microalgae *Nannochloropsis* spp. using the binary mixture of organic solvents and water [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 27: 79-85
- [87] Bekhit A D, Suwandy V, Carne A, et al. Effect of repeated pulsed electric field treatment on the quality of hot-boned beef loins and topsides [J]. *Meat Sci*, 2016, 111: 139-146
- [88] Suwandy V, Carne A, Van D V R, et al. Effect of pulsed electric field treatment on the eating and keeping qualities of cold-boned beef loins: impact of initial pH and fibre orientation [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(6): 1355-1365