

脉冲强光技术对食品加工品质的影响 及安全控制技术研究进展

符传涵, 杨海花*, 李瑜, 董冠男, 王周利

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 脉冲强光是一类新兴的非热处理技术, 该装置以稀有气体被电离后释放高能量的脉冲光来降低固体表面或液态食品中的微生物负载量, 从而延长食品的货架寿命, 且对多种营养成分造成不明显的破坏, 还可以改良部分食品的理化性质和感官品质, 这弥补了传统热力杀菌方法与化学杀菌方法的缺陷。脉冲强光中的光化学效应、光热效应被认为是降低食品中微生物负载量的主要机制。综合多方面的研究, 脉冲强光技术在食品加工和安全控制中均取得了较好的处理效果。该研究主要综述了脉冲强光技术在食品加工和安全控制方面的应用进展, 评价了不同脉冲强光处理对食品品质中部分理化指标的变化情况, 最后展望了脉冲强光技术的前景与该技术的部分不足之处, 为脉冲强光技术在食品工业领域广泛应用提供参考。

关键词: 脉冲强光; 食品加工; 安全控制; 品质分析

文章编号: 1673-9078(2024)05-325-338

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0797

Research Progress on the Influence of Pulsed Intense Light Technology on Food Processing Quality and Safety Control Technology

FU Chuanhan, YANG Haihua*, LI Yu, DONG Guannan, WANG Zhouli

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Pulsed intense light is a kind of emerging non-heat treatment technology. The device allows the ionization of rare gases to release high-energy pulsed light to reduce the microbial load on a solid surface or liquid food, so as to prolong the shelf life of food. This technique does not cause obvious damage to various nutrients, and can also improve certain food physico-chemical properties and sensory quality, which makes up for the defects of traditional thermal sterilization methods and chemical sterilization methods. The photochemical and photothermal effects of pulsed intense light are considered to be the main mechanisms for reducing microbial load in food. Based on comprehensive research on various aspects, pulsed intense light technology has achieved good outcomes in food processing and safety control. This article mainly reviews the application progress of pulsed intense light technology in food processing and safety control, and evaluates the changes in some physico-chemical indexes of food quality caused by different pulsed intense light treatments. Finally, the prospect of pulsed intense light technology and some deficiencies of the technology are provided, which offers a reference for the wide application of pulsed intense light technology in the food industry.

Key words: pulsed intense light; food processing; safety control; quality analysis

引文格式:

符传涵, 杨海花, 李瑜, 等. 脉冲强光技术对食品加工品质的影响及安全控制技术研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 325-338.

FU Chuanhan, YANG Haihua, LI Yu, et al. Research progress on the influence of pulsed intense light technology on food processing quality and safety control technology [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 325-338.

收稿日期: 2022-06-23

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2019NY-107)

作者简介: 符传涵 (2001-), 男, 本科生, 研究方向: 果蔬加工与质量安全检测控制研究, E-mail: fch34985@126.com

通讯作者: 杨海花 (1981-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品功能因子、果蔬精深加工与全效利用, E-mail: haihuayang@nwsuaf.edu.cn

脉冲强光 (Pulsed Intense Light), 又称脉冲光 (Pulsed Light, PL)、强脉冲光 (Intense Pulsed Light, IPL)、脉冲紫外光 (Pulsed UV Light, PUV) 等, 是一种非热物理加工技术, 依托惰性气体被电离瞬间释放的强光带来的能量施加到固体食品物料表面、透明度较高的液体和气体, 进而杀灭微生物, 并改变食品物料的质构和部分组分。脉冲强光技术起源于 20 世纪 70 年代后期的日本, 于 1984 年在美国注册专利, 而后美国纯亮公司利用此专利尝试在各种物体表面进行灭菌。尽管后来多数公司都获得过专利^[1], 但受限于不成熟的技术, 不完善的脉冲光设备和理论研究, 脉冲强光杀菌技术并没有得到推广。起初, 脉冲强光技术只是运用于药品生产流水线和医疗器械的外表面的杀菌消毒。随着技术不断成熟, 脉冲强光技术和设备的适用范围逐渐扩大到食品工业领域, 主要用于提高食品贮藏性和固体食品表面与液体食品内微生物的灭活^[2], 也用于与食品接触的包装材料 (瓶盖、瓶胚、杯子、膜封) 的杀菌消毒^[3]。1996 年, 美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 的第 21 条法案批准将脉冲强光技术用于食品生产、加工和处理, 但脉冲通量不得超过 12 J/cm^2 。时至今日, 脉冲强光技术已成为食品非热加工技术的应用手段之一。本文将从脉冲强光发生装置工作原理、杀灭微生物的主要机制、杀菌技术的应用优势、脉冲强光技术在食品安全控制和对食品品质产生的影响这五个方面展开论述, 并在最后总结了脉冲强光技术的部分不足之处, 以期在脉冲强光技术在食品工业的广泛应用提供参考。

1 脉冲强光发生装置工作原理

脉冲强光发生设备主要由惰性气体灯单元和动力单元构成, 动力单元是向惰性气体灯单元提供高电压高电流的脉冲部件, 为惰性气体的电离提供能量; 惰性气体灯单元在动力单元提供脉冲能量的基础上电离惰性气体, 产生的电子在惰性气体灯单元中形成轴向非均匀的放电通道, 电子与其他惰性气体原子相互碰撞继续引起更多原子电离, 继而产生波长范围 $200\sim 1100 \text{ nm}$ 的脉冲光, 其光谱与太阳光谱十分相近, 但强度却是太阳光的数千倍至数万倍。直至脉冲能量不足以再使惰性气体进行火花放电为止。一次脉冲强光照即为一工作, 其工作间隔 (重复频率) 可以通过调整设备参数触发时间以控制^[2,4,5]。

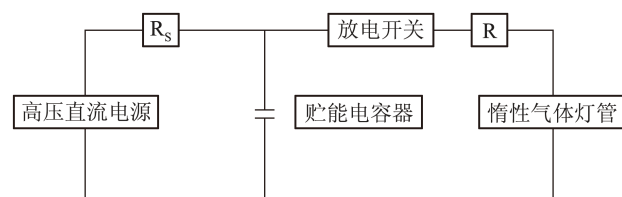


图 1 脉冲强光发生设备工作基本原理图

Fig.1 Schematic diagram of pulse intense light generator

2 脉冲强光杀灭微生物的主要机制及致死机制评价

目前研究普遍认为脉冲光中的紫外波段在杀菌中发挥主要作用, 其中紫外光谱分为三个波段: UV-A: $320\sim 400 \text{ nm}$; UV-B: $280\sim 320 \text{ nm}$; UV-C: $200\sim 280 \text{ nm}$ 。其中 UV-C 是紫外线光谱作用于核酸最强烈的波段。Cassar 等^[6]采用三种发射不同光谱的脉冲氙灯 (灯 C 光谱范围为 $190\sim 1080 \text{ nm}$, 灯 B 光谱范围为 $235\sim 1080 \text{ nm}$, 灯 A 光谱范围为 $365\sim 1080 \text{ nm}$) 杀灭大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌和蜡状芽孢杆菌。经历多次脉冲后的结果表明, 灯 A 的杀灭效率均明显低于灯 B 与灯 C。灯 A 与灯 B、灯 C 的区别在于是否包括紫外波段, 而紫外波段的有无则直接决定了各氙灯的杀菌效率, 故而脉冲强光杀灭微生物的主要机制归因于光谱中的紫外波段。脉冲强光的紫外波段和近红外波段均具有较高的能量辐射强度, 多段光谱协同作用于微生物, 加速微生物失活^[7]。表 1 列举了微生物响应脉冲强光的不同机制。

目前公认脉冲强光杀灭微生物的主要机制有二, 其一是光化学效应, 光化学效应是指物质的分子吸收了外来光子的能量后激发的化学反应^[8]。光化学效应诱导胸腺嘧啶二聚化, 从而影响 DNA 的物理化学结构, 进而导致遗传信息受损、复制和基因转录受损, 最终细胞死亡^[9]。Aguirre 等^[10]揭示了此类 DNA 畸变产物主要是环丁烷嘧啶二聚体和 6-4 嘧啶酮, 二者的比率为 5:1, 但 6-4 嘧啶酮比环丁烷嘧啶二聚体造成了更强的 DNA 扭曲。实际上, 亦有研究认为光化学效应还致使细胞氧化产物积累。陈晴^[11]的研究证实了脉冲强光诱导沙门氏菌产生大量超氧阴离子和活性氧, 并钝化了超氧化物歧化酶的活性, 沙门氏菌最终因累积的超氧阴离子和活性氧而死亡。其二是光热效应, 光热效应指材料受光照射后, 光子能量与晶格相互作用, 振动加剧,

温度升高^[8]。脉冲的强光可使细胞液局部过热，细胞液蒸发，细胞内的压力增大，细胞质膜爆裂，细胞内容物泄露，最终导致细胞死亡^[12]。Xu 等^[13]发现了大肠杆菌在脉冲强光处理后，因细胞内水分急剧蒸发，一些处理过的细胞完全丧失膜的完整性；Ferrario 等^[14]通过流式细胞仪和透射电镜观察到受脉冲强光处理后的酿酒酵母细胞器功能紊乱，细胞器膜和质膜破裂，细胞形态严重皱缩，证实脉冲强光杀灭微生物的主要机制之一是受光热效应所致的膜破裂。光化学效应与光热效应协同作用，实现对微生物的灭活。两种主要机制协同作用，实现对微生物的灭活。除了光化学效应和光热作用的主要机制之外，脉冲强光还能瞬时冲击细胞壁和其他细胞成分，使细胞死亡，这称为光物理作用^[15]。实际上，脉冲强光杀灭微生物的途径和机理是复杂且多方面的，其中 DNA 结构的变化是主要的，细胞膜破裂、蛋白质变性和脂质过氧化等生物大分子受破坏是次要的^[16]。

值得注意的是，脉冲强光杀灭微生物后，残余菌种也许表现亚致死损伤（或“可存活但不可培养状态（Viable but Non-culturable, VBNC）”）。VBNC 态的菌种在有利条件下，微生物逐渐修复自身并再次繁殖，在误判食品中微生物存活总数与存

活状态的情况下，食品安全可能受到严重威胁，故 VBNC 态菌种的具体存活及修复机制，以及毒力评估，亦值得探讨。Ferrario 等^[14]的研究还发现，亚致死的酿酒酵母尽管失去了在培养基中继续生长的能力，但代谢活性依然可以被观测到；Kramer 等^[17]的研究结果表明，处于 VBNC 态的细菌依然还能产生 ATP。在修复机制方面，Faghihzadeh 等^[18]观察到，经脉冲强光照射后的大肠杆菌比未处理组具有更长的延滞期和更慢的生长速度，这归结成了微生物的 DNA 光修复机制；Schottroff 等^[19]认为，常暴露于日光下的细菌在进化适应方面上可能有助于抵抗脉冲强光中紫外波段对 DNA 的损伤，比如光裂合酶、糖基化酶、核酸内切酶或核苷酸切除修复等 DNA 修复手段。此外，脉冲强光引起微生物的大分子破坏，微生物亦通过调节相关基因表达以抵抗或修复此类破坏，如 Aguirre 等^[10]通过转录组学，揭示了 VBNC 态的无害李斯特菌在响应脉冲光下的基因表达状态，一般应激蛋白 Ctc、与核苷酸和脂肪酸代谢以及翻译过程相关的蛋白质表达上调，而鞭毛蛋白和一些葡萄糖代谢蛋白表达下调。额外的，还有研究注意到炭黑曲霉在脉冲强光闪光后，赭曲霉毒素 A 的合成与转运受阻^[20]；但单增李斯特菌经处理后，其三个重要的毒力基因表达却上调了^[20]。

表 1 微生物响应脉冲强光的不同机制

Table 1 Different mechanisms of microbial response to pulsed light

菌种	菌种减少量	具体机制	参考文献
<i>Listeria innocua</i>	3.01~8.82 lg CFU/mL	菌种滞后期时间延长；DNA 链内形成嘧啶二聚体；一般应激蛋白 Ctc、与核苷酸和脂肪酸代谢以及翻译过程相关的蛋白质表达上调，而鞭毛蛋白和一些葡萄糖代谢蛋白表达下调	[10]
<i>Aspergillus carbonarius</i>	—	渗透压、细胞壁和细胞膜完整性相关的差异表达基因转录水平下调，致使细胞内部空心，细胞器紊乱，细胞壁变薄，细胞膜在视野下模糊；线粒体肿胀；细胞质中的碎片进入液泡；与能量和葡萄糖代谢、运输和赭曲霉毒素 A 生物合成相关的差异表达基因转录水平下调；DNA 双链断裂，产生大量小 DNA 片段	[20]
<i>Listeria monocytogenes</i>	2.33 lg CFU/mL	应激反应、转录与翻译、鞭毛蛋白、细胞膜基因（毒力基因、碱性磷酸酶、阳离子外排转运蛋白）和糖类、氨基酸与核酸代谢相关的基因表达水平上调	[21]
<i>Escherichia coli</i>	10 ⁵ ~10 ⁶ CFU/mL	细胞完整性缺失，蛋白质、ATP、DNA 泄露；ATP 酶、β-半乳糖苷酶、碱性磷酸酶、拓扑异构酶活性受抑制；活性氧浓度提升	[22]
<i>Aspergillus flavus</i>	4.79 lg CFU/mL	孢子不规则缩小，表面皱缩，细胞壁出现孔状结构	[23]
<i>Bacillus subtilis</i>	6.01 lg CFU/mL	核酸和蛋白质泄露，2,6-吡啶二羧酸和 Ca ²⁺ 外泄，细胞膜通透性变化；非特异性酯酶活性降低	[24]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10 ⁶ ~10 ⁷ CFU/mL	超氧化物歧化酶、碱性磷酸酶活性降低；细胞膜通透性和离子通道发生变化；产生脂质过氧化	[25]
<i>Listeria innocua</i> <i>Escherichia coli</i>	>6 lg CFU/mL	酯酶活性降低，膜完整性缺失，细胞去极化；活性氧浓度升高；DNA 分子损伤，出现链断裂	[26]

3 脉冲强光技术在食品安全控制技术上的应用

3.1 脉冲强光技术在杀菌应用方面的优势

综合现有研究,脉冲强光技术在杀菌应用上的优势体现在以下几个方面:(1)光谱范围宽,多段光谱协同作用,杀菌效率高,微生物失活快;(2)脉冲强光作用时间短,冷却时间充足,瞬时能量高但平均输出能量少,温升幅度小,适用于热敏性较高的食品,如牛奶、果汁等^[27];(3)脉冲强光装置可以根据生产环境和生产需求,定制不同形状的灯管,设置不同的脉冲频率、闪照距离等可调参数;(4)相比于需要预热、长时间照射的紫外线灯,脉冲强光发生设备可以即开即停,且操作更为简单^[28];(5)脉冲强光装置常用填充气体为惰性气体,相比于常规的紫外线灯,不存在重金属汞泄露的风险^[29];(6)食品物料与设备不会发生直接接触,有效避免了二次染菌的风险。

3.2 细菌、霉菌和酵母杀灭应用

目前已有诸多研究涉及脉冲强光杀灭食品中的细菌、霉菌和酵母。本节从设备可调节的参数、菌种和食品基质这三个角度分别讨论脉冲强光杀灭微生物的效率。

从设备可调节的参数的角度来看,所有可调节的参数最终都会影响脉冲通量的大小。如设备向氙灯输出的电压、闪光次数(闪照次数)、闪光间隔和光源距离。设备向氙灯输出的电压越高,闪光次数越多,或食物距离光源越近,取得的杀菌效果越强,但也要兼顾食品品质变化等问题。Hwang等^[30]的研究证实了大肠杆菌的灭活效果随着处理电压和处理时间的增加而增加。John等^[31]发现,微生物失活水平随着脉冲数量的增加而增加,并随着距光源的空间距离的增加而降低。闪光间隔越短,杀菌效果不一定越好。廖云辉^[32]研究了重复频率对脉冲氙灯杀菌效率的影响,在其他因素不改变的情况下,随着重复频率从1 Hz增加至3 Hz,杀菌效率从75.21%提升至79.52%。尽管杀菌效率随着重复频率的提升而增加,但增加幅度越来越小。在试验过程中升高了氙灯的闪光频率,使得单次闪照的放电时间短于氙灯的实际放电时间,换言之,上一次放电尚未结

束时脉冲氙灯已经开始了下一次充能,因此单位时间内脉冲氙灯的杀菌效率不会和重复频率呈正线性相关关系。

从菌体本身而言,与初始菌种量、菌种活力、自身的抵抗能力有关。第一,初始菌种量越高,菌体之间越有可能相互遮蔽形成阴影,导致表层微生物已全部失活,但深层的微生物难以杀灭,即阴影效应。第二,菌种活力与环境有关,也与自身所处生长期有关。处于延滞期(或叫迟缓期)的微生物细胞对环境较敏感。Cudemos等^[33]的研究指出,不同生长期的荧光假单胞菌、蜡状芽孢杆菌和酿酒酵母在受到脉冲光的影响时,处于对数期的细胞比处于延滞期的细胞对脉冲光更敏感,而处于延滞期的细胞又比处于稳定期的细胞更加敏感。第三,从自身的抵抗能力上来看,微生物对脉冲强光的抵抗能力从高到低大致排序为真菌孢子、细菌芽孢、寄生虫、病毒,最后是细菌繁殖体^[34]。菌种颜色决定自身抵抗能力。Esbelin等^[35]研究了色素在脉冲光发射中对黑曲霉菌株的保护作用,等同条件下,黑色的孢子抵抗力远大于浅黄色的孢子,白色的孢子抵抗力最差。

从食品基质的角度来看,食品表面的平整或粗糙、色素含量等因素都会影响脉冲强光的杀菌效果。Koch等^[36]发现,在同处理条件下,脉冲强光在猪皮表面取得的杀菌效果优于猪里脊肉,这可能与猪里脊肉表面的凹凸不平而猪皮表面较为光滑有关系。Koch等认为,这种杀菌效果的差异来源于皮肤与肌肉之间的轮廓、孔洞的多少和表面粗糙度。王纯冰等^[37]利用脉冲强光杀菌系统对流动水中大肠杆菌进行连续杀灭研究,结果表明,脉冲强光的杀菌率随着吸光度的增大而减小,且各水样的色度对杀菌效果有显著影响。正交试验后,证实了色度为影响脉冲强光杀菌的首要因素。Heinrich等^[38]认为,富含脂肪和蛋白质的食品基质以孤立的双键和共轭双键吸收脉冲强光的紫外波段,或是UV-B在280 nm处的吸收得以提升,故杀菌效果还取决于食品基质中脂肪和蛋白质。Maftai等^[39]报道过,脉冲光杀灭扩展青霉受不同液面厚度的苹果汁影响,液面厚度越大,杀菌效果越差。此外,Xu等^[40]通过研究发现,连续螺旋流通的红葡萄酒汁以中等流量通过杀菌设备时,取得的杀菌效果最好。

3.3 病毒和寄生虫杀灭应用

病毒和寄生虫杀灭应用如下。Jubinville 等^[41]研究了脉冲光对草莓、树莓和黑莓上附着的甲型肝炎病毒和小鼠诺如病毒的灭活程度,用总通量为 11.45 J/cm^2 的脉冲光处理后,草莓上附着的甲型肝炎病毒的灭活量分别减少了 2.10 lg PFU/mL 和 1.61 lg PFU/mL ,树莓上的病毒分别减少了 1.97 lg PFU/mL 和 1.89 lg PFU/mL ,而黑莓较之于草莓和树莓,灭活量较少,分别减少了 1.25 lg PFU/mL 和 1.37 lg PFU/mL 。Craighead 等^[42]利用脉冲光消杀了香菜、生菜、菠菜和番茄四种蔬菜表面的隐孢子虫。在最强烈的脉冲通量 0.07 J/cm^2 下处理了 90 s ,香菜、生菜、菠菜和番茄表面上的隐孢子虫卵浓度分别降低了 1.65 个对数值、 2.64 个对数值、 2.51 个对数值和 2.19 个对数值。关于病毒和寄生虫的杀灭,国内外研究成果相对较少。推测脉冲强光杀灭病毒的作用机制也是光化学效应。脉冲强光杀灭寄生虫的作用机理尚未探明,也没有相较于细菌、霉菌和酵母的广泛应用。

3.4 霉菌毒素、过敏原与抗生素的降解应用

在霉菌毒素减控方面,最常见降解的是附着于植物食品原料的霉菌在生长代谢中产生的真菌毒素,如黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、玉米赤霉烯酮和展青霉素等。Moreau 等^[43]的研究揭示了脉冲强光均能降解大部分的玉米赤霉烯酮、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、黄曲霉毒素 B_1 和赭曲霉毒素;Funes 等^[44]发现 McIlvaine 缓冲液和苹果汁在 35.8 J/cm^2 的脉冲能量处理下,展青霉素残留量分别为 $5\% \sim 15\%$ 和 22% 。此外,脉冲强光降解霉菌毒素的作用机制、降解产物及其毒力评估也值得注意。Wang 等^[45]在响应面法优化后,葡萄汁中的赭曲霉毒素 A 的降解率可以达到 95.29% ;赭曲霉毒素 A 动物实验表明,脉冲强光处理降低了赭曲霉毒素 A 的毒性,葡萄汁接近无毒状态;产物解析表明,赭曲霉毒素 A 降解后的主要产物是赭曲霉毒素 α 和苯丙氨酸。Qi 等^[46]使用脉冲强光闪光 40 次苹果汁中的黄曲霉毒素后,黄曲霉毒素 B_1 、黄曲霉毒素 B_2 、黄曲霉毒素 G_1 和黄曲霉毒素 G_2 的降解率分别为 72.09% 、 73.65% 、 57.06% 和 69.69% ;结构解析表明,内酯环发生断裂,末端呋喃环上的双键被水中产生的自由基加成。Li 等^[47]在距离光源 8.5 cm 处

施加 40.50 J/cm^2 ,处理苹果汁 6.5 min 后,果汁中的展青霉素降解率达到了 96.27% ;结构解析表明,展青霉素的内酯环被破坏,产生毒性较低的脱氧展青酸,证实了脉冲强光是具备较好解毒作用的加工技术。

关于过敏原与抗生素降解应用的研究如下。Yang 等^[48]采用脉冲紫外光降解了花生制品中的过敏原。结果表明,在 $111.60 \sim 223.2 \text{ J/cm}^2$ 的能量范围内,三种致敏蛋白在 SDS-PAGE 分析图中的条带强度随着施加的脉冲通量的提升和处理时间的延长而减弱,尤其在 10.80 cm 、 223.20 J/cm^2 的条件下,三种过敏蛋白均未检出特征条带;两种花生提取物和花生酱浆液的 ELISA 分析显示 IgE 结合体减少量分别为对照组的 12.9 倍和 6.7 倍。另外, Yang 等^[49]利用脉冲紫外光处理虾提取物中的原肌球蛋白,将虾提取物置于模拟消化道中的胃液和肠液进行后续消化以检验原肌球蛋白的稳定性,结果显示,脉冲紫外光与胃蛋白酶联合处理虾提取物和单一胃蛋白酶处理相比,经历前者处理的原肌球蛋白水平比后者少了 20% ;不论是单一胰蛋白酶处理,脉冲紫外光和胰蛋白酶联合处理,还是脉冲紫外光与胃蛋白酶和胰蛋白酶三者联合处理时,在消化 120 min 时,均检不出原肌球蛋白,证明了脉冲紫外光在降解虾提取物中的原肌球蛋白时也有一定能力。王娜等^[50]发现脉冲强光可以显著降解发酵面团中小麦醇溶蛋白,且小麦醇溶蛋白的抗原性降低至 70% 以下。焦睿智等^[51]利用脉冲强光降解木耳浸提液中的抗生素, 30 次闪光可使得恩诺沙星与环丙沙星降解率最高分别可达 99.17% 和 98.61% 。最后,表 2 总结了脉冲强光在食品安全控制方面的应用案例。

4 脉冲强光技术对食品加工品质的影响

如前节所述,脉冲强光是一种能够作用于固体食品表面、透明度较高的液体和气体的非热物理加工技术,在杀灭微生物的同时,也会改变食品物料的质构和部分组分,故本节从色泽、风味物质、食品质构与部分酶的活性变化、营养物质变化这四个角度,分别讨论关于脉冲强光技术对食品加工品质的影响。表 3 则从另一角度列举并全面回顾了脉冲强光在食品加工中的应用案例及其影响。

表 2 脉冲强光在食品安全控制方面的应用案例
Table 2 Application cases of pulsed light in food safety control

食品基质	危害因子	处理因素	最优处理条件	处理结果	参考文献
切碎的大蒜 鱿鱼 马尼拉蛤	大肠杆菌	处理时长 处理电压	7 min 2 kV	大肠杆菌在切碎的大蒜、鱿鱼和马尼拉蛤中分别减少了 2.65、1.84 和 0.93 lg CFU/g	[30]
苹果汁	扩展青霉	单次脉冲通量 脉冲次数 液面厚度	0.4 J/cm ² 40 次 6 mm	扩展青霉减少量高达 3.76 lg CFU/mL, 果汁 pH 值和可溶性固形物略微变化, 颜色稍微加深	[39]
湿米粉	大肠杆菌 金黄色葡萄球菌 单增李斯特菌	包装袋 闪光次数 输入电压	高透光率包装袋 5 次 7 kV	脉冲强光处理可完全杀灭 10 ³ CFU 的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌, 单增李斯特菌的存活率低于 3%	[52]
橙汁 菠萝汁 椰汁	大肠杆菌	总脉冲通量	95.2 J/cm ²	橙汁、菠萝汁和椰汁分别获得了 4.0、4.5 和 5.33 lg CFU/mL 的失活量	[53]
脱脂乳粉 小麦粉 蛋清粉	克罗诺杆菌 粪肠球菌	光源的光谱 粉状食品的厚度 距光源的空间距离 脉冲次数	190~1 100 nm 1.2 mm 8 cm 3~4 次	在脱脂乳粉、小麦粉和蛋清粉中, 克罗诺杆菌和粪肠球菌分别减少了 5 和 2.7 lg CFU/g, 且没有出现不良团聚现象	[54]
草莓	灰葡萄孢霉	总脉冲通量	47.8 J/cm ²	灰葡萄孢霉的菌种量减少了 3.5 lg CFU; 灰葡萄孢霉分生孢子的存活曲线呈上凹状, 符合 Weibull 分布模型	[55]
草莓 树莓 黑莓	甲型肝炎病毒 小鼠诺如病毒	脉冲通量 距光源的空间距离	11.78 J/cm ² 7.5 cm	草莓与树莓表面的甲型肝炎病毒的滴度降低了 2.10 和 1.97 lg PFU/mL, 小鼠诺如病毒的滴度则降低了 1.61 和 1.89 lg PFU/mL; 黑莓表面的两种病毒滴度分别降低了 1.25 和 1.37 lg PFU/mL	[41]
香菜 生菜 菠菜 番茄	小隐孢子虫卵囊	处理时长	90 s	香菜、生菜、菠菜和番茄的最大对数减少量(对数基因组拷贝数)分别为 2.4、4.3、2.5 和 2.2	[42]
葡萄汁	赭曲霉毒素 A	毒素初始浓度 辐照距离 稀释倍数 脉冲次数	50 μg/L 2 cm 3 倍 40 次	在最优处理条件下, 葡萄汁中的赭曲霉毒素 A 的降解率可以达到 95.29%	[45]
苹果汁	黄曲霉毒素	汁层深度 辐照距离 毒素初始浓度 闪光次数	2 mm 3.5 cm — 40 次	脉冲强光闪光 40 次苹果汁中的黄曲霉毒素后, 黄曲霉毒素 B ₁ 、黄曲霉毒素 B ₂ 、黄曲霉毒素 G ₁ 和黄曲霉毒素 G ₂ 的降解率分别为 72.09%、73.65%、57.06% 和 69.69%; 毒素初始浓度对脉冲光的降解速率影响并不大	[46]
苹果汁	展青霉素	毒素初始浓度 果汁浓度 闪光次数	— — 30 次	毒素的初始浓度没有显著影响降解的一级速率常数, 试验选定的果汁浓度透光率均在 95% 以上, 故苹果汁浓度的变化对展青霉素的降解没有显著影响	[47]
脱脂大豆粉	大豆 7S 球蛋白	脉冲能量 脉冲时间	700 J 20 次	脉冲强光改变其二、三级结构, 乳化活性与乳化稳定性提升, 表面疏水性增大, 显著改善大豆 7S 球蛋白的理化特性, 在结构变化的基础上改变抗原表位, 在 700 J、20 次的条件下, 以潜在致敏性抑制率表征的抗原与抗体结合能力为 46.13%	[56]
黑木耳及黑木耳浸提液	恩诺沙星 环丙沙星	光照距离 抗生素初始浓度 光照次数 浸提液稀释倍数	5 cm 0.5 mg/kg 30 次 5 倍	最优条件下, 黑木耳中的恩诺沙星和环丙沙星降解率为 82.84% 和 81.10%, 黑木耳浸提液则为 99.17% 和 98.61%	[51]

4.1 色泽

脉冲强光加工过食品后, 往往会出现色泽变化的现象。Bhagat 等^[57]发现, 受可能的花青素降解产生棕色聚合物影响, 与未处理的石榴汁相比, 经脉冲光照射后的石榴汁颜色更亮, 更红, 并具有相似的黄色。Dhar 等^[58]也注意到脉冲光的强度显著影响到了混合果汁的色泽, 具体表现为随着脉冲通量的增加, L^* 值减少, a^* 值增加, b^* 值减少, 即总色差的增大。前两则应用案例都发现过果汁颜色褐变的现象。事实上, 多数色素对光都较不稳定, 这归因于自由基, 尤其是氧自由基, 与自身的共轭双键发生反应而破坏显色结构。花色苷自身结构的不饱和性决定其对活性氧十分敏感, 而脉冲强光处理过程中难免产生活性氧, 故脉冲强光处理部分果汁时会出现颜色变化的情况。而抗坏血酸与花色苷共存体系中, 若存在活性氧, 则还原性更强的抗坏血酸优先淬灭活性氧, 但会产生过氧化氢, 而过氧化氢会使得花色苷失去显色结构, 生成无色的酯和香豆素衍生物。这类降解产物进一步分解与聚合后, 导致果汁中常出现棕色沉淀^[59], 这解释了为什么前述研究表明脉冲强光处理果汁时会出现颜色褐变的现象。尽管脉冲强光处理果汁时会出现颜色褐变的现象, 但 Basak 等^[60]还发现, 脉冲光处理的水果饮料的低褐变值与在适宜处理条件下抗坏血酸和总酚的高保留率相关联。

前述的色泽变化关注了果汁饮料, 而脉冲强光处理过肉类后, 也会有一定的色泽变化。Zhang 等^[61]发现, 受可能的肌红蛋白氧化成高铁肌红蛋白和不同程度的脂质氧化, 导致了大黄鱼肉在贮藏期间 a^* 值减少, b^* 值提升, L^* 值也有所下降。Duma-Kocan 等^[62]发现, 施加到猪肉上的脉冲光对颜色参数 a^* 和 b^* 的变化或褐变指数没有显著影响, 但随着储存时间的延长, 总色差变得明显甚至清晰可见。但 Ganan 等^[63]的研究表明, 脉冲光的处理并未显著改变即食鲑鱼片和即食里脊肉片的颜色参数, 同时, Ganan 等认为腌制肉内含的色素比鲜肉更稳定。除了果汁饮料中的花色苷降解和肉制品中的色素氧化引起的色值变化, Mandal 等^[64]还注意到 6.22 J/cm^2 以下的脉冲通量能保持茶汤原有色泽, 否则茶黄素转变为茶红素, 致使 L^* 值增大; 何友建^[65]的研究则表明了脉冲强光在杀菌的同时, 对灵芝复合茶饮料的褐变值仅产生很小的变化, 0.63% 的茶多酚损失率、可溶性多糖与氨基酸不超过 0.5%

的损失率证实了茶汤中的褐变程度极低, 这有赖于茶多酚的低氧化程度和较少发生的美拉德反应。

4.2 风味物质

脉冲强光处理食物后, 也许会给食物带来味觉或嗅觉上的变化。Wu 等^[66]的研究表明, 60 s 、 1.38 W/cm^2 的脉冲强光处理的山兰米酒减少了苦味氨基酸的含量, 有效保持了鲜味和甜味氨基酸含量, 提高了 14 种风味物质的浓度, 增强了醇和酯的成分。Baptista 等^[67]则注意到脉冲光处理丢失了鸡胸肉应有的鸡味、鸡皮味和甜味, 并显著减少了总挥发性物质中的部分醛类, 如十六醛、壬醛和苯甲醛等。Kang 等^[68]组织的感官评价小组则认为脉冲光处理过后的脱脂奶粉和复原乳都获得了整体风味、焦糊味和鲜香气味的增强。Söbeli 等^[69]发现, 脉冲光处理导致牛排中的一些挥发性化合物含量增加, 如己醛、2-庚烯醛、2-辛烯醛等, 其中大部分可归因于紫外线光化学效应导致的脂质氧化。Hierro 等^[70]则认为, 8.4 J/cm^2 和 11.2 J/cm^2 的脉冲通量会损害牛肉片和金枪鱼片的感官质量。在 8.4 J/cm^2 的脉冲通量下, $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 贮藏了 4 d 的牛肉片和金枪鱼片都出现了明显的硫磺气味和蒸煮外观, 更强烈的 11.2 J/cm^2 处理使得牛肉片和金枪鱼片获得了更差的感官评价。Ignat 等^[71]也证实了暴露于高脉冲通量处理与储存期间苹果片风味特征的负面变化有关。总的来说, 适宜的脉冲强光处理条件可以在杀菌的基础上有效改善食物的风味, 甚至是消解去不良风味, 超出适宜条件之外的处理会获得不期望的效果。

4.3 食品质构与酶的活性变化

脉冲强光处理食品后引起的质构改变和酶活性变化的研究如下。Li 等^[72]的研究发现, 脉冲闪光频率为 10 c 时, 湿面筋含量和稳定时间达到最大值, 维持面筋蛋白的二级结构的共价键和分子间作用力受破坏, 鲜湿面条的质构也得到较大改善, 此外, 脉冲强光还钝化多酚氧化酶, 抑制了面团在加工过程中的褐变。Hua 等^[73]研究了脉冲强光如何控制因长途运输的杏子产生的生理损伤, 在质构方面主要表现为钝化细胞壁修饰酶系的活性, 延缓水溶性果胶的溶解和纤维素的降解, 避免了杏子软化, 且延长了保质期。Charles 等^[74]以总通量为 8 J/cm^2 的脉冲光处理鲜切芒果, 可以有效保持贮藏期间鲜切芒果的硬度, 具体机制解释为芒果应激产生的多胺参与了与钙类似的反应, 结合果胶酸形成阳离子交联,

或是限制细胞壁与降解酶的接触可能性,另一机制则是脉冲光的光热效应致使芒果切面形成一层干燥薄膜,从而保持了硬度。考虑到芒果中存在的氧化应激,多酚氧化酶的活性相比未处理组,前者提升了约50%,但没食子酸、类胡萝卜素和抗坏血酸的含量却没有显著变化。Patel等^[75]认为相较于微波和红外,脉冲光处理的粗糖表现出较小的结构特性修改,X射线衍射图谱显示,脉冲光处理的粗糖相对结晶度为61%,比未处理组增加了仅11%。Alhendi等^[76]将大豆置于脉冲灯9 cm处闪光150 s,所得的大豆中的脂肪氧合酶完全失活,阻止了大豆向豆奶加工过程中可能产生的异味。周婷婷等^[77]证实了脉冲强光处理可显著抑制双孢蘑菇中过氧化物酶和多酚氧化酶的活性,并有利于贮藏期间双孢蘑菇的品质最大程度保持。

总之,关于脉冲强光改变食品质构方面,我们不易找到相近或相关的趋势。类似的研究是涉及可食用淀粉薄膜的改性。Gutiérrez等^[78]注意到木薯淀粉膜和芋头淀粉膜在脉冲光处理后,淀粉老化回生或变质,结晶度提升;两种薄膜的结构更致密,这与疏水性增强所致的接触角增大相对应,表面粗糙度有所提升;脉冲光处理后使得淀粉薄膜的拉伸强度下降。综合前述研究报道,我们认为脉冲强光确实可以改变食品质构,但处理结果如何,要取决于处理条件及处理对象。而在脉冲强光钝化酶的机制上,俞静芬等^[79]认为,这与蛋白质的聚集和分解改变酶活性有关,也与诱导二硫键的还原有关。赵震震等^[80]探究脉冲强光对果蔬内源酶活性的抑制效果及相关机理,结果表明,经历处理的多酚氧化酶表面疏水性及游离巯基含量上升,最佳发射波长红移, α 螺旋含量下降, β 型结构含量提升,还促进蛋白氧化。

4.4 营养物质变化

涉及脉冲强光在营养物质的组分及含量变化的研究指标主要有蛋白、油脂、糖、多酚及总抗氧化能力。实际上,前四小节所涉及的研究,多半都已涉及并探讨脉冲强光处理与食品中营养物质的变化。Elmnasser等^[81]探究了 2.2 J/cm^2 的脉冲光引起牛奶蛋白质的构象变化,结果显示, β -乳球蛋白的内在色氨酸荧光在10个脉冲后显示出7 nm红移,5个脉冲及之后交联成了二聚体;尚未观察到显著的氨基酸组分变化及脂质氧化现象,牛奶中也没有发生赖氨酸残基含量依赖性的美拉德反应。但是脉

冲光处理后已有对光敏感的视黄醇被氧化或降解。Ouyang等^[82]在评估脉冲紫外光对液体蛋清中大肠杆菌和沙门氏菌灭活作用的同时,还关注到了蛋清质量。质量评估表明,脉冲紫外线不会改变液体蛋清的起泡能力或泡沫稳定性,但会诱导蛋清中的脂质氧化,且随着处理强度,蛋清的浊度也有明显提升,这归因于较高强度的脉冲紫外光处理可能会导致更多的蛋清蛋白变性或聚集。曹少谦等^[83]探讨了脉冲强光对大豆油与猪油的影响,结果表明,同处理条件下,猪油比植物油更容易发生过氧化,随脉冲时间延长和脉冲距离缩短,猪油和大豆油的丙二醛含量、羰基价和自由基含量都随之升高。还有研究发现带壳核桃受 43 J/cm^2 的脉冲光处理后,丙二醛含量、过氧化值、总酚和抗氧化活性没有显著提升^[84]。Escott等^[85]用脉冲光处理发酵前的葡萄,除了控制表皮的野生微生物,还提高了发酵纯度和葡萄酒质量,具体表现为残余糖、乙醇和有机酸含量均没有相较于对照组的显著变化,同时也消解了一些草本风味的挥发性物质。Denoya等^[86]注意到未成熟的柿子和成熟柿子在接受 20 kJ/m^2 和 60 kJ/m^2 的脉冲光处理后贮藏至多6 d,果实的总可溶性固形物含量不受脉冲光处理,而与可溶性丹宁转化为不可溶态有关;暴露于 20 kJ/m^2 的未成熟柿子的总酚含量比未处理组高,总抗氧化活性也比未处理组的高,这归因于果实的氧化应激。Rybak等^[87]认为,相较于未处理的红甜椒,脉冲光处理后的鲜切红甜椒保留了更多的抗坏血酸、总酚和类胡萝卜素,还提高了氧自由基清除能力。Chakraborty等^[88]还发现,脉冲光巴氏灭菌的鲜食葡萄汁中维生素C最多损失12.3%,抗氧化能力最多损失13.7%。戚向阳等^[89]探讨脉冲强光处理对采后食用菌保鲜效果的影响,认为 48.8 J/cm^2 的处理强度可以使得保藏至12 d的新鲜香菇获得了比对照组更好的营养品质,其中总酚质量分数比对照组高42.61%,维生素C质量分数比对照组高88.45%,还原糖质量分数比对照组高96.39%。

除了前述食品加工领域的五种应用以外,脉冲强光还有部分食品加工应用场合,如产果胶酶的黑曲霉受脉冲强光诱变后出产了稳定性有所提高的果胶酶^[90],通过脉冲强光诱变并选育高产谷胱甘肽的酿酒酵母^[91],诱变花生发芽以富集白藜芦醇^[92],还通过脉冲强光富集发芽糙米中的 γ -氨基丁酸^[93],与之接近的还有脉冲光诱导甜瓜产生特定代谢物阻抑苍白镰刀菌侵染^[95]等。

表 3 脉冲强光在食品加工中的应用案例
Table 3 Application cases of pulsed light in food processing

食品基质	处理条件	处理结果	参考文献
石榴汁	1 287~2 988 J/cm ²	多酚氧化酶和过氧化物酶的活性降低; 对总可溶性固形物、可滴定酸和 pH 值无显著影响; 大部分处理强度均保持了石榴汁的总酚含量, 但维生素 C 则损失了 8.6%~17% 不等; 总色差变化范围在 1.1~3.9 之间	[57]
混合果汁 (菠萝、椰子和醋栗)	222.9~3 143 J/cm ²	多酚氧化酶和过氧化物酶的分别失活高达 41% 和 51%, 抗坏血酸最多损失了 36%; 最强烈的处理条件下, 总色差为 6.4, 酚类物质增加了 14%	[58]
混合果汁 (苹果、杨桃和葡萄)	3 000 J/cm ²	经过脉冲光处理的果汁冷藏 45 d 后, 比巴氏杀菌的果汁多保留了 61% 的抗氧化能力、38.8% 的酚类物质和 68.2% 的维生素 C; pH 值、总可溶性固形物和可滴定酸含量没有显著变化; 脉冲光处理也还有效防止了果汁的褐变	[60]
带壳核桃	0~42.8 J/cm ²	脉冲光处理对核桃的硫代巴比妥酸含量、过氧化值、总酚和抗氧化能力均没有显著差异, 但显著增加了草木气味的挥发性物质浓度, 减少了与水果和柑橘气味相关的化合物	[84]
葡萄汁	1 152~3 186 J/cm ²	多酚氧化酶、过氧化物酶和果胶甲酯酶的失活率均高于 90%; 脉冲光在 pH 值为 3.0、3.5 和 4.0 的条件下都没有显著影响到果汁的颜色特征, 也没有改变葡萄汁的 pH 值、可溶性固形物含量和可滴定酸度; 维生素 C 和抗氧化能力在脉冲光处理后最多损失量分别为 12.3% 和 13.7%	[88]
草莓	L3: 0.05 J/cm ² /pulse, 55 cm, 20 s H3: 0.1 J/cm ² /pulse, 35 cm, 10 s H5: 0.1 J/cm ² /pulse, 35 cm, 16 s	贮藏期间, 对照组和三种不同处理的草莓质量减少没有显著差异; H5 处理的草莓的 L*、a* 和 b* 值总体上受到轻微影响, 而 L3 和 H3 组的草莓并未影响色值; 三种不同处理的草莓硬度随贮藏时间的增加而先硬后软, 但总高于初始状态; 贮藏期间, 对照样品和脉冲光处理样品的总抗氧化活性没有显著差异	[95]
芒果	3.6~10.8 J/cm ²	维生素 C 和类胡萝卜素的浓度比未处理的芒果干高 10%~40%; 与未经处理的芒果干相比, 在脉冲通量为 3.6~7.2 J/cm ² 的芒果干中, 维生素 B ₁ 、B ₃ 和 B ₅ 增加了 10%~25%, 但维生素 B ₆ 损失了 40%~50%	[96]
即饮红茶	1.07~17.2 J/cm ²	6.22 J/cm ² 以下的脉冲通量能保持茶汤原有色泽; 总体来看, 总酚含量不受脉冲通量变化的太多影响, 抗氧化能力也没有显著变化	[64]
大黄鱼	100~500 J/pulse, 30 pulse	300 J/pulse 的处理使得大黄鱼在储存过程中的挥发性盐基氮和硫代巴比妥酸增加速度较缓慢, L* 和 a* 颜色参数比对照组下降得更慢; 经过脉冲光处理的大黄鱼可以有效延缓其质地品质的下降; 500 J/pulse 的处理使得鱼肉的整体感官评价得分普遍较低	[61]
鸡胸肉	2.82~9.68 J/cm ²	经脉冲光处理的鸡胸肉颜色变得稍微浅, 同时更红、更黄, 也丢失了鸡胸肉应有的鸡味、鸡皮味和甜味, 并显著减少了总挥发性物质中的部分醛类	[67]
牛排	0.525~4.2 J/cm ²	样品中的 pH 值、总水分、灰分、蛋白质含量和脂质含量与对照组相比无明显差异, 总色差变化不大, 不易被察觉; 脉冲光处理导致牛排中的一些挥发性化合物含量增加, 如己醛、2-庚烯醛、2-辛烯醛等	[69]
蛋清	0.15~0.38 J/cm ² /pulse	尽管液体蛋清的 pH 值会发生变化, 但没有超出正常范围; 液体蛋清的起泡能力或泡沫稳定性没有改变, 但会出现脂质氧化, 丙二醛含量增加; 中度和重度处理会致使蛋清蛋白聚集而浑浊蛋清	[82]
鸡柳	1.25~10.8 J/cm ²	10.8 J/cm ² 的处理使得鸡柳产生了晒伤气味; 少部分化合物在 10.8 J/cm ² 处理后获得了浓度提升, 如戊烷、庚烷、丙酸等	[97]

续表 3

食品基质	处理条件	处理结果	参考文献
即食火腿	2.1~8.4 J/cm ²	伊比利亚火腿的过氧化值低于塞拉诺火腿, 这归因于前者来自受富含生育酚的橡子饲养的猪, 导致肌肉中积累了 γ -生育酚, 提升了抗氧化能力; 脉冲光提高了一些特定挥发性物质的浓度, 这些物质散发出轻微的硫磺和金属味, 但在储存过程中这些物质消失了	[98]
乳清蛋白	4~16 J/cm ²	脉冲光处理导致巯基基团浓度增加和羰基形成, 并改变了一、二和三级构象, 溶解度和功能特性得到显著改善, 这可以增加乳清蛋白的加工性能, 如溶解度和发泡能力	[99]

5 脉冲强光技术的展望

脉冲强光作为一种新兴的非热杀菌技术, 不仅具有传统热力杀菌和化学杀菌方法不可比拟的优势, 对于其他食品, 还可以提高耐贮藏性和改善食品品质。但是脉冲强光在食品工业中的应用甚少, 原因在于 (1) 脉冲强光发生设备型号不一, 条件不一, 且大部分试验均没有响应面优化, 且试验复现难度高, 制定使用标准或规范存在一定困难。(2) 1996 年时 FDA 规定应用于食品的脉冲通量不得超过 12 J/cm², 实际上多数研究中应用的脉冲通量早已超过此标准, 是否应当放开标准, 提高脉冲通量的限制, 这也是要考虑的问题之一。(3) 脉冲强光对初始菌种量较高的食品并没有取得较好的杀菌效果, 推测是菌体之间形成的遮蔽阴影阻碍了脉冲光的杀菌效果所致; 而同样的, 脉冲强光也不适合食品包装后杀菌, 部分包装材料会削弱脉冲光的杀菌效果。(4) 有研究表明, 脉冲强光处理单增李斯特菌时, 随代数的增加而出现了脉冲抵抗^[100]。尽管知晓了 VBNC 态的菌种存活机制, 若以需要更强的脉冲通量克服之, 可能会产生食品感官评价不良、营养物质流失加快等问题, 这也是制约脉冲强光在食品领域应用中可能的技术壁垒。(5) 尽管脉冲强光处理后的食品物料温升幅度小, 但不意味着食品物料不会发生局部劣变, 工业生产流程上可以考虑冰浴处理或强制对流加速散热, 如及时搅拌液体物料和振摇待加工产品。(6) 脉冲强光发生装置的惰性气体灯管有寿命限制, 且内部填充的气体价格昂贵, 故设备价格也昂贵, 这可能是脉冲强光发生在食品工业中应用甚少的主要原因。

总体来说, 脉冲强光技术在食品杀菌与食品加工上积累了丰富的研究应用案例, 呈现出广阔的前景, 也存在着短板。目前依然需要更完善的研究及应用案例为脉冲强光技术在食品工业中的应用提供

强有力的技术支持。从目前来看, 脉冲强光较为适合加工液体食品。最后, 多种杀菌技术耦合是目前食品杀菌的趋势, 还可以考虑与其他技术, 如等离子体、超高压、抑菌物质、光敏剂等技术或物质相结合, 探讨更完善的食品杀菌技术和食品加工方法。

参考文献

- [1] 张银苹. 脉冲强光动态空气杀菌效果的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [2] 江天宝. 脉冲强光杀菌技术及其在食品中应用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- [3] 张军凯, 包青平, 孙志锋, 等. 食品加工新型杀菌技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(8): 3099-3103.
- [4] 谢鹤, 韩秋漪, 李福生, 等. 脉冲强光杀菌技术综述[J]. 光源与照明, 2020, 11: 31-34.
- [5] 王龔, 郑勇, 杨开. 脉冲强光在食品杀菌中的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 397-408.
- [6] CASSAR J R, MILLS E W, DEMIRCI A. Characterization of pulsed light for microbial inactivation [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 334: 111152.
- [7] GÓMEZ-LÓPEZ V M, RAGAERT P, DEBEVERE J, et al. Pulsed light for food decontamination: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18: 464-473.
- [8] 杜艳, 陈复生. 脉冲光在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 177-182.
- [9] MAHENDRAN R, RAMANAN K R, BARBA F J, et al. Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 67-79.
- [10] AGUIRRE J S, FERNANDO G G, HIERRO E, et al. Characterization of damage on *Listeria innocua* surviving to pulsed light: Effect on growth, DNA and proteome [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 284: 63-72.
- [11] 陈晴. 月桂酸单甘油酯复合抑菌剂、臭氧和脉冲强光对沙门氏菌的杀菌机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [12] HILTON S T, DE MORAES J O, MORARU C I. Effect

- of sublethal temperatures on pulsed light inactivation of bacteria [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 39: 49-54.
- [13] XU W Q, WU C Q. The impact of pulsed light on decontamination, quality, and bacterial attachment of fresh raspberries [J]. *Food Microbiology*, 2016, 57: 135-143.
- [14] FERRARIO M, GUERRERO S, ALZAMORA S M. Study of pulsed light-induced damage on *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice by flow cytometry and transmission electron microscopy [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 1001-1011.
- [15] MANDAL R, MOHAMMADI X, WIKTOR A, et al. Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10: 3606.
- [16] WUYTACK E Y, DUONG THI PHUONG L, AERTSEN A, et al. Comparison of sublethal injury induced in *Salmonella enterica serovar Typhimurium* by heat and by different nonthermal treatments [J]. *Journal of Food Protection*, 2003, 66(1): 31-37.
- [17] KRAMER B, WUNDERLICH J, MURANYI P. ATP-synthesis capacity of pulsed light-exposed bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2017, 40: 383-387.
- [18] FAGHIHZADEH F, ANAYA N M, HADJERES H, et al. Pulse UV light effect on microbial biomolecules and organic pollutants degradation in aqueous solutions [J]. *Chemosphere*, 2019, 216: 677-683.
- [19] SCHOTTROFF F, FRÖHLING A, ZUNABOVIC-PICHLER M, et al. Sublethal injury and Viable but Non-culturable (VBNC) state in microorganisms during preservation of food and biological materials by non-thermal processes [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2773.
- [20] WANG Y, ZHENG Y, ZHOU AY, et al. Transcriptomic analysis reveals the inhibition mechanism of pulsed light on fungal growth and ochratoxin A biosynthesis in *Aspergillus carbonarius* [J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112501.
- [21] UESUGI A R, HSU C L, WOROBO R W, et al. Gene expression analysis for *Listeria monocytogenes* following exposure to pulsed light and continuous ultraviolet light treatments [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 68: 579-588.
- [22] ZHU YL, LI CZ, CUI HY, et al. Antimicrobial mechanism of pulsed light for the control of *Escherichia coli* O157:H7 and its application in carrot juice [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106751.
- [23] 王蓓,洪晨,Ragab Khir,等.脉冲强光对黄曲霉菌孢子的杀菌效果、微观结构及动力学的影响[J].*中国食品学报*,2020,20(4):10-17.
- [24] 管峰,徐雯钗,袁勇军,等.脉冲强光对枯草芽孢杆菌NG-2灭活机理[J].*食品科学*,2017,38(23):70-74.
- [25] 张佰清,王嵘.脉冲强光对啤酒酵母细胞损伤及通透性的影响[J].*食品科学*,2013,34(21):111-114.
- [26] KRAMER B, MURANYI P. Effect of pulsed light on structural and physiological properties of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2013, 116: 596-611.
- [27] WALLEN R D, MAY R, RIEGER K, et al. Sterilization of a new medical device using broad-spectrum pulsed light [J]. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 2001, 35(5): 323-330.
- [28] 蒋明明.脉冲强光对典型微生物灭活效能与机理研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [29] 马凤鸣,张佰清,徐江宁,等.脉冲强光杀菌装置设计的初步研究[J].*食品与机械*,2005,21(6):66-67.
- [30] HWANG H, PARK J, CHUNG M, et al. Microbial inactivation in fresh and minimally processed foods by intense pulsed light (IPL) treatment [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(7): 939-948.
- [31] JOHN D, RAMASWAMY H S. Comparison of pulsed light inactivation kinetics and modeling of *Escherichia coli* (ATCC-29055), *Clostridium sporogenes* (ATCC-7955) and *Geobacillus stearothermophilus* (ATCC-10149) [J]. *Current Research in Food Science*, 2020, 3: 82-91.
- [32] 廖云辉.脉冲氙灯空气杀菌效果的实验研究[D].天津:天津大学,2018.
- [33] CUDEMOS E, IZQUIER A, MEDINAMARTÍNEZ M S, et al. Effects of shading and growth phase on the microbial inactivation by pulsed light [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2013, 31(2): 189-193.
- [34] ROWAN N J. Pulsed light as an emerging technology to cause disruption for food and adjacent industries-Quo vadis? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 316-332.
- [35] ESBELIN J, MALLEA S, J RAM A F, et al. Role of pigmentation in protecting *Aspergillus niger* conidiospores against pulsed light radiation [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2013, 89: 758-761.
- [36] KOCH F, WIACEK C, BRAUN P G. Pulsed light treatment for the reduction of *Salmonella typhimurium* and *Yersinia enterocolitica* on pork skin and pork loin [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 292: 64-71.
- [37] 王纯冰,孔庆财,徐伟,等.脉冲强光对流动水中大肠杆菌的杀灭效果研究[J].*食品科技*,2011,36(4):36-40,44.
- [38] HEINRICH V, ZUNABOVIC M, VARZAKAS T, et al. Pulsed light treatment of different food types with a special focus on meat: a critical review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56: 591-613.
- [39] MAFTEI N A, RAMOS-VILLARROEL A Y, NICOLAU A

- I, et al. Influence of processing parameters on the pulsed-light inactivation of *Penicillium expansum* in apple juice [J]. Food Control, 2014, 41: 27-31.
- [40] XU FF, WANG B, HONG C, et al. Optimization of spiral continuous flow-through pulse light sterilization for *Escherichia coli* in red grape juice by response surface methodology [J]. Food Control, 2019, 105: 8-12.
- [41] JUBINVILLE E, TRUDEL-FERLAND M, AMYOT J, et al. Inactivation of *Hepatitis A virus* and *Norovirus* on berries by broad-spectrum pulsed light [J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 364: 109529.
- [42] CRAIGHEAD S, HUANG R, CHEN H, et al. The use of pulsed light to inactivate *Cryptosporidium parvum* oocysts on high-risk commodities (Cilantro, mesclun lettuce, spinach, and tomatoes) [J]. Food Control, 2021, 126: 107965.
- [43] MOREAU M, LESCURE G, AGOULON A, et al. Application of the pulsed light technology to mycotoxin degradation and inactivation [J]. Journal of Applied Toxicology, 2013, 33: 357-363.
- [44] FUNES G J, GÓMEZ-LÓPEZ P L, RESNIK S L, et al. Application of pulsed light to patulin reduction in McIlvaine buffer and apple products [J]. Food Control, 2013: 30: 405-410.
- [45] WANG L R, LIU X S, CAI R, et al. Detoxification of Ochratoxin A by pulsed light in grape juice and evaluation of its degradation products and safety [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 78: 103024.
- [46] QI L G, MA Y L, CAI R, et al. Degradation of aflatoxins in apple juice by pulsed light and the analysis of their degradation products [J]. Food Control, 2023, 148: 109648.
- [47] LI Y, CAI R, FU C H, et al. Degradation of patulin in apple juice by pulsed light and its effect on the quality [J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16: 870-880.
- [48] YANG W, MWAKATAGE N R, KRISHNAMURTHY K, et al. Mitigation of major peanut allergens by pulsed ultraviolet light [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012: 5: 2728-2738.
- [49] YANG W, SHRIVER S K, CHUNG S Y, et al. *In vitro* gastric and intestinal digestions of pulsed light-treated shrimp extracts [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, 166(6): 1409-1422.
- [50] 王娜,孟利军,黄忠民,等.加工方式对发酵面团中小麦醇溶蛋白抗原性的影响[J].中国食品学报,2021,21(3):138-145.
- [51] 焦睿智,郭天敏,李靖妍,等.脉冲强光对木耳及其浸提液中抗生素的降解效果及品质影响[J].现代食品科技, 2023,39(7):298-304.
- [52] 田芳,李勇,唐娇艳,等.脉冲强光杀菌技术在湿米粉中的应用研究[J].粮食与油脂,2022,35(9):51-53,57.
- [53] PREETHA P, PANDISELVAM R, VARADHARAJU N, et al. Effect of pulsed light treatment on inactivation kinetics of *Escherichia coli* (MTCC 433) in fruit juices [J]. Food Control, 2021, 121: 107547.
- [54] CHEN D J, CHENG YL, PENG P, et al. Effects of intense pulsed light on *Cronobacter sakazakii* and *Salmonella* surrogate *Enterococcus faecium* inoculated in different powdered foods [J]. Food Chemistry, 2019, 296: 23-28.
- [55] ROMERO BERNAL A R, CONTIGIANI E V, GONZÁLEZ H H L, et al. *Botrytis cinerea* response to pulsed light: Cultivability, physiological state, ultrastructure and growth ability on strawberry fruit [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 309: 108311.
- [56] 张华,敬起鸣,张照勇,等.脉冲强光对大豆7S球蛋白理化特性、结构变化及潜在致敏性影响的研究[J].食品安全质量检测学报,2022,13(18):5878-5886.
- [57] BHAGAT B, CHAKRABORTY S. Potential of pulsed light treatment to pasteurize pomegranate juice: Microbial safety, enzyme inactivation, and phytochemical retention [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 159: 113215.
- [58] DHAR R, CHAKRABORTY S. Influence of voltage and distance on quality attributes of mixed fruit beverage during pulsed light treatment and kinetic modeling [J]. Journal of Food Process Engineering. 2020, 43, 1-14.
- [59] Li J, Song H G, Dong N, et al. Degradation kinetics of anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as affected by ascorbic acid [J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23: 89-96.
- [60] BASAK S, MAHALE S, CHAKRABORTY S. Changes in quality attributes of pulsed light and thermally treated mixed fruit beverages during refrigerated storage (4 °C) condition [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 78: 103025.
- [61] ZHANG J Y, ZHOU G C, JI S Q, et al. Effect of pulse light on the quality of refrigerated (4°C) large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 167: 113855.
- [62] DUMA-KOCAN P, RUDY M, GIL M, et al. The impact of a pulsed light stream on the quality and durability of the cold-stored longissimus dorsal muscle of pigs [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20: 4043.
- [63] GANAN M, HIERRO E, HOSPITAL X F, et al. Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products [J]. Food Control, 2013, 32: 512e517.
- [64] MANDAL R, WIKTOR A, MOHAMMAD X, et al. Pulsed UV light irradiation processing of black tea infusions: effect on color, phenolic content, and antioxidant capacity [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15: 92-104.
- [65] 何友建.灵芝复合茶饮料加工技术的研究[D].福州:福建农林大学,2010.

- [66] WU X Q, ZHANG Y Z, ZHONG Q P. Optimization of the brewing conditions of Shanlan Rice Wine and sterilization by thermal and intense pulse light [J]. *Molecules*, 2023, 28: 3183.
- [67] BAPTISTA E, BORGES A, AYMERICH T, et al. Pulsed light application for *Campylobacter* control on poultry meat and its effect on colour and volatile profile [J]. *Foods*, 2022, 11: 2848.
- [68] KANG M, CHEN D J, RUAN R, et al. The effect of intense pulsed light on the sensory properties of nonfat dry milk [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86: 4119-4133.
- [69] SÖBELI C, UYARCAN M, KAYAARDI S. Pulsed UV-C radiation of beef loin steaks: Effects on microbial inactivation, quality attributes and volatile compounds [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021, 67: 102558.
- [70] HIERRO E, GANAN M, BARROSO E, et al. Pulsed light treatment for the inactivation of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna *carpaccio* [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 158: 42-48.
- [71] IGNAT A, MANZOCCO L, MAIFRENI M, et al. Surface decontamination of fresh-cut apple by pulsed light: Effects on structure, colour and sensory properties [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 91: 122-127.
- [72] LI X J, ZHANG J, LIU X L, et al. Effect of pulsed light treatment on the physicochemical properties of wheat flour and quality of fresh wet noodles [J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 99: 920-930.
- [73] HUA X W, LI TT, WU C E, et al. Pulsed light improved the shelf life of apricot (after simulated long-distance air transportation) by regulating cell wall metabolism [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 196: 112187.
- [74] CHARLES F, VIDAL V, OLIVE F, et al. Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh cut mangoes [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 18: 190-195.
- [75] PATEL A M, DHAR R, CHAKRABORTY S. Pulsed light, microwave, and infrared treatments of jaggery: Comparing the microbial decontamination and other quality attributes [J]. *Food Control*, 2023, 149: 109695.
- [76] ALHENDI A, YANG W, GOODRICH-SCHNEIDER R, et al. Total inactivation of lipoygenase in whole soya bean by pulsed light and the effect of pulsed light on the chemical properties of soya milk produced from the treated soya beans [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53: 457-466.
- [77] 周婷婷,曹少谦,张境,等.脉冲强光处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响[J].核农学报,2020,34(5):994-1001.
- [78] GUTIRÉREZ T J, GONZÁLEZ G. Effects of exposure to pulsed light on surface and structural properties of edible films made from cassava and taro starch [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9: 1812-1824.
- [79] 俞静芬,林旭东,尚海涛,等.脉冲强光技术在果蔬保鲜中的研究进展[J].保鲜与加工,2021,21(8):146-150.
- [80] 赵震震,马丹妮,蔡金秀,等.脉冲强光对多酚氧化酶活性及结构特性的影响[J].核农学报,2020,34(9):1996-2002.
- [81] ELMNASSER N, DALGALARRONDO M, ORANGE N, et al. Effect of pulsed-light treatment on milk proteins and lipids [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2008, 56: 1984-1991.
- [82] OUYANG B N, DEMIRCI A, PATTERSON P H. Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* in liquid egg white by pulsed UV light and its effects on quality [J]. *Journal of Food Processing*, 2020, 43: e13243.
- [83] 曹少谦,郑啸谷,毛志康,等.脉冲强光对油脂氧化稳定性的影响[J].中国食品学报,2021,21(3):183-192.
- [84] GÓMEZ-LÓPEZ V M, NOGUERA-ARTIAGA L, FIGUEROA-MORALES F, et al. Effect of pulsed light on quality of shelled walnuts [J]. *Foods*, 2022, 11: 1186.
- [85] ESCOTT C, VAQUERO C, FRESNO del MANUEL J, et al. Pulsed light effect in red grape quality and fermentation [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10: 1540-1547.
- [86] DENOYA G I, PATARO G, FERRARI G, et al. Effects of postharvest pulsed light treatments on the quality and antioxidant properties of persimmons during storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 160: 111055.
- [87] RYBAK K, WIKTOR A, POBIEGA K, et al. Impact of pulsed light treatment on the quality properties and microbiological aspects of red bell pepper fresh-cuts [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111906.
- [88] CHAKRABORTY S, PARAB P V. Pulsed light treatment of table grape juice: Influence of matrix pH on microbial and enzyme inactivation kinetics [J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102662.
- [89] 戚向阳,周婷婷,曹少谦.不同强度脉冲强光对鲜香菇保鲜效果的影响[J].农业工程学报,2019,35(3):287-293.
- [90] 葛新宇.脉冲强光对果胶酶生产黑曲霉的诱变研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [91] 孙肇敏.脉冲强光诱变谷胱甘肽生产菌酿酒酵母的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [92] 付欣,渠皓琳,孙剑,等.脉冲强光处理对花生芽理化指标及白藜芦醇富集的影响[J].食品研究与开发,2022,43(7):24-29.
- [93] 张良晨,李东红,于淼等.双响应值联合优化发芽糙米脉冲强光杀菌耦合 γ -氨基丁酸富集技术研究[J].食品研究与开发,2019,40(19):69-75.
- [94] FILHO F O, SILVA E, LOPES M M, et al. Effect of pulsed light on postharvest disease control-related metabolomic variation in melon (*Cucumis melo*) artificially inoculated with *Fusarium pallidoroseum* [J]. *PLOS ONE*, 2020, 15(4): e0220097.

- [95] CAO X N, HUANG R Z, CHEN H Q. Evaluation of food safety and quality parameters for shelflife extension of pulsed light treated strawberries [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(6): 1494-1500.
- [96] BRAGA T R, SLIVA E O, RODRIGUES S, et al. Drying of mangoes (*Mangifera indica L.*) applying pulsed UV light as pretreatment [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 114: 95-102.
- [97] MCLEOD A, LILAND K H, HAUGEN J, et al. Chicken fillets subjected to UV-C and pulsed UV light: Reduction of pathogenic and spoilage bacteria, and changes in sensory quality [J]. *Journal of Food Safety*, 2018, 38: e12421.
- [98] FERNÁNDEZ M, HOSPITAL X F, CABELLOS C, et al. Effect of pulsed light treatment on *Listeria* inactivation, sensory quality and oxidation in two varieties of Spanish dry-cured ham [J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126294.
- [99] SIDDIQUE M A B, MARESCA P, PATARO G, et al. Effect of pulsed light treatment on structural and functional properties of whey protein isolate [J]. *Food Research International*, 2016, 87: 186-196.
- [100] HEINRICH V, ZUNABOVIC M, PETSCHNIG A, et al. Previous homologous and heterologous stress exposure induces tolerance development to pulsed light in *Listeria monocytogenes* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 490.