

冷杀菌技术与植物源抑菌剂联合抗菌研究进展

魏丽娜*, 崔晓亭, 赵咪, 徐颖, 刘欢

(陕西科技大学食品科学与工程学院, 陕西西安 710021)

摘要: 随着食品安全意识不断深入人心, 人们更加青睐于安全高效的新型抗菌技术。相对于传统杀菌技术, 冷杀菌技术简单易操作、处理温度低、对食品感官品质影响小、杀菌的同时能较好地保存食品的营养成分。植物源抑菌剂相对于化学防腐剂不仅安全高效, 而且具有广泛的生物活性, 如抗氧化、抑制肿瘤细胞增殖、免疫调节等, 然而, 单独使用冷杀菌技术不能完全杀灭病原菌, 植物源抑菌剂使用成本高, 其难溶性和强烈的挥发性气味也限制了其应用。该研究综述了冷等离子体、紫外线、超高压和超声波这几种冷杀菌技术分别与植物源抑菌剂的联合抗菌研究进展, 指出了冷杀菌技术与植物源抑菌剂的联合应用不仅能降低冷杀菌技术的处理强度和植物源抑菌剂的使用浓度, 而且增强了抗菌效果, 冷杀菌技术与植物源抑菌剂的联合应用在食品保鲜领域有着广阔的应用前景。该研究为这两种技术的协同抗菌研究提供一定的理论参考, 并就其应用前景及应用中存在的问题进行了探讨。

关键词: 冷杀菌技术; 植物源抑菌剂; 联合抗菌技术; 协同作用

文章编号: 1673-9078(2023)03-348-355

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.3.0905

Research Progress of Cold Sterilization Technology Combined with Plant-derived Antibacterial Agents

WEI Lina*, CUI Xiaoting, ZHAO Mi, XU Ying, LIU Huan

(School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: With increasing awareness of food safety, people are becoming more interested in safe and efficient new antibacterial technology. Compared with traditional sterilization technology, cold sterilization technology is simple and easy to apply and has low processing temperature, little impact on food sensory quality, and results in improved preservation of the nutritional content of food in addition to sterilization. Plant-derived antibacterial agents are not only safe and efficient preservatives, but also have a wide range of biological activities, such as antioxidation, inhibition of tumor cell proliferation, and immune regulation. Thus, the use of plant-derived preservatives poses much less of a risk to human health than do chemical reagents. However, the use of cold sterilization technology alone cannot completely kill pathogenic bacteria, and the high cost, poor solubility, and strong volatile odor of plant-derived antibacterial agents also limit their application. In this review, we summarize the research progress of cold sterilization technology, such as cold plasma, ultraviolet light, ultra-high pressure and ultrasonic technology, combined with plant-derived antibacterial agents. The combined application of cold sterilization technology and plant-derived antibacterial agents can not only reduce the treatment intensity of cold sterilization technology and the concentration of plant-derived antibacterial agents, but also enhance the antibacterial effect. The combined application of cold sterilization technology and plant-derived antibacterial agents has broad application prospects in the field of food preservation. We discuss the theoretical basis for the synergistic research of these two technologies as well as their application prospects and existing challenges in their application.

Key words: cold sterilization technology; plant-derived antibacterial agents; combined antibacterial technology; synergistic effect

引文格式:

魏丽娜, 崔晓亭, 赵咪, 等. 冷杀菌技术与植物源抑菌剂联合抗菌研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 348-355.

WEI Lina, CUI Xiaoting, ZHAO Mi, et al. Research progress of cold sterilization technology combined with plant-derived antibacterial agents [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 348-355.

收稿日期: 2022-07-18

基金项目: 陕西省重点研究开发项目(2017TSCXL-NY-02-03); 国家自然科学基金项目(32070129); 陕西省科技厅重点研发计划项目(2022NY-027)

作者简介: 魏丽娜(1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食源性致病菌防控研究, E-mail: weilina@sust.edu.cn

微生物对食品的污染是导致食品变质并爆发食源性疾病的主要原因。食源性疾病对消费者的身体健康以及国家的经济发展构成了巨大的威胁^[1]。为了有效地控制食源性疾病的爆发,确保食品安全,人们开发了各种杀菌及抗菌的技术。传统方法有热力杀菌(如巴氏杀菌、微波杀菌、欧姆杀菌等)和化学防腐剂(如山梨酸钾、苯甲酸钠等)抗菌。其中,热力杀菌设备需要高温高压,虽然能有效地杀灭有害微生物,但是其设备耗能大,所需升温 and 降温时间较长^[2,3],且高温会破坏感官品质和营养成分,造成维生素和挥发性风味化合物的损失,降低食品的食用及营养价值。化学防腐剂具有潜在的毒性,不利于人体的健康。随着科技的发展,处理温度低、绿色安全、操作简单、且能有效保持食品的色香味和营养成分的冷杀菌技术越来越受到研究者的青睐。同时,各种植物源抑菌剂不但高效、无毒,且兼具抗氧化、免疫调节等多种生物活性,因此较之化学防腐剂更受到越来越多研究者的关注,具有广阔的应用前景。

然而,单独使用冷杀菌技术并不能完全杀灭有害微生物,长时间或高强度的处理也会对食品的品质造成不良影响。植物源抑菌剂大多水溶性差,有挥发性气味,应用成本高。研究表明,将冷杀菌技术和植物源抑菌剂联合使用可以降低冷杀菌技术处理强度、缩短处理时间,减少抑菌剂的使用浓度,增强抗菌效果^[4]。本文综述了冷等离子体、紫外线、超高压和超声波这几种冷杀菌技术分别与植物源抑菌剂的联合抗菌研究进展,旨在为开发新的杀菌方式提供参考,为食品保鲜提供新的研究方向。

1 冷等离子体协同抗菌

等离子体(Plasma)是物质除固、液、气三态之外的第四种状态,是气体在高压电场间被击穿而发生电离而产生的带电粒子和中性粒子的混合体,整体为电中性,包含了各种处于基态与激发态的原子和分子、光子、离子、自由电子等成分^[5,6]。根据离子温度与电子温度的不同,可将等离子体分为高温等离子体和低温等离子体(冷等离子体)。由于冷等离子体具有耗时短、工作效率高、安全无毒害、简单易操作等优点,已广泛应用于食品去污^[7]、毒素降解^[8,9]和包装改性,灭活食品内源酶^[10]方面。

迄今为止,已有大量研究证实了冷等离子体的广谱抑菌性(细菌、芽孢、真菌、病毒等)^[11]。Liao等^[12]将冷等离子体对微生物的作用机制归结为等离子体产生的活性成分对膜或细胞内成分(如DNA、蛋白质、碳水化合物等)的氧化损伤、对蛋白质结构和功能的

调节、活性氧造成的诱导损伤、电穿孔现象。但是冷等离子体的穿透力有限,表面结构复杂的食品会对细菌形成物理屏障,降低杀菌效果^[13]。近年来,人们为提高它的抗菌效果,将其与抗菌剂联合处理,见表1。

1.1 对浮游态细菌的协同抗菌研究

Yoo等^[14]研究了丁香精油与包囊化常压等离子体(Encapsulated Atmospheric Pressure Plasma, EAP)单独或联合使用对大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*)的杀灭作用。实验表明,对于这两种病原菌,丁香精油和EAP单独使用的减少量小于3 log CFU/mL,而联合处理的减少量大于7.5 log CFU/mL。同时还表明,丁香精油和EAP之间的协同杀菌效果是由于丁香精油增加了细菌对后续EAP处理的敏感性,而不是EAP处理增加了丁香精油本身的抗菌活性。Cui等^[15]研究了冷氮等离子体(Cold Nitrogen Plasma, CNP)与柠檬草精油对单核细胞增生性李斯特菌(*Listeria monocytogenes*, *L. monocytogenes*)的协同抗菌作用。发现高剂量的柠檬草精油可破坏细胞膜,导致细胞内成分(DNA、蛋白质、ATP等)损失。与未处理组相比,单独用CNP和低剂量的柠檬草精油处理后,*L. monocytogenes*仅减少0.96和0.59 log CFU/g,而协同处理后,活细胞数减少了2.80 log CFU/g。

1.2 对细菌生物被膜协同抗菌研究

生物被膜是由附着在表面的多层细菌群落形成的,包埋在自产的胞外聚合物基质中,主要由蛋白质、碳水化合物和核酸等组成^[16]。细菌能够在食品和食品器具表面上形成生物被膜,从而可为其内的细菌提供保护,不利于其清除。冷等离子体处理生物被膜需要较长时间,容易造成食品内部升温,破坏营养^[17]。近年来,冷等离子体和抗菌剂的联合使用已经受到了许多学者的关注。

Cui等^[18]研究了蜡菊精油和CNP对不同食物接触表面*S. aureus*生物被膜的协同作用。发现单独用精油或CNP处理时,*S. aureus*的生物被膜中的活菌数只减少了约2 log CFU/cm²;联合处理将生物被膜中的活菌数降低到2 log CFU/cm²以下。同时,他们也研究了CNP和丁香精油对生菜上*E. coli* O157:H7生物被膜的协同抗菌作用^[19]。发现与未处理组相比,协同处理后,使生物被膜里的活菌数减少了5.48 log CFU/cm²,而CNP处理未能显著减少*E. coli* O157:H7生物被膜,丁香精油处理后仅减少了约2.8 log CFU/cm²。

综上所述,冷等离子体和植物源抑菌剂的组合可

以成功灭活不同食品中或其接触表面上病原体 and 生物外膜，增加了菌体细胞膜的通透性，加剧了胞内成分被膜里的活菌。这是由于联合处理破坏细菌细胞壁和（如核酸和 DNA）从故障膜泄漏，导致细胞失活。

表 1 冷等离子体与植物源抑菌剂联合抗菌实例汇总

Table 1 A summary of the combined antibacterial examples of cold plasma and plant-derived bacteriostatic agents

抑制对象	冷等离子体处理参数	植物源抑菌剂	抑菌剂使用质量浓度	食品基质/介质	文献
<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	2.2 kHz, 15 min	丁香精油	1.5%(V/V)	牛肉干	[14]
<i>L. monocytogenes</i>	500 W, 2 min	柠檬草精油	5 mg/mL	猪腰	[15]
<i>Salmonella enterica</i> serovar <i>Enteritidis</i> , <i>Salmonella typhimurium</i>	400 W, 1 min	百里香精油	0.5 mg/mL	蛋壳	[20]
<i>L. monocytogenes</i> , <i>S. typhimurium</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	250 W, 20 min	柚皮苷	500 µg/mL	-	[21]
<i>E. coli</i> , <i>S. typhimurium</i> , <i>L. monocytogenes</i>	40 W, 1 min	绿茶提取物	50 mg/mL	鲜切火龙果	[22]
<i>E. coli</i>	500 W, 0.5 min	孜然醛/ β -环糊精包合物	2.5 mg/mL	新鲜黄瓜汁和番茄汁	[23]
<i>E. coli</i> 生物被膜	400 W, 2 min	丁香精油壳聚糖纳米 粒子纤维膜溶液	6 mg/mL	黄瓜、青椒、胡萝卜、 小番茄	[17]
<i>S. aureus</i> 生物被膜	400 W, 1 min	蜡菊精油	0.5 mg/mL	不锈钢、聚苯乙烯塑料	[18]
<i>E. Coli</i> 生物被膜	400 W, 3 min	丁香精油	1 mg/mL	生菜	[19]

表 2 紫外线与植物源抑菌剂联合抗菌实例汇总

Table 2 A summary of the combined antibacterial examples of ultraviolet light and plant-derived bacteriostatic agents

抑制对象	紫外线处理参数	植物源抑菌剂	抑菌剂使用质量浓度	食品基质/介质	文献
<i>L. monocytogenes</i> , <i>S. typhimurium</i>	10 W/m ² , 1.2 kJ/m ² , 2 min	肉桂皮油乳液	0.02%(V/V)	红甜菜	[32]
<i>Aspergillus niger</i> , <i>Rhizopus oryzae</i>	3.6 kJ/m ²	丁香精油	1.56%(V/V)	干柿子	[34]
<i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> , total yeasts and molds	5 kJ/m ² , 0 kJ/m ²	柠檬草精油/牛至精油:柑橘 提取物:乳酸 (0.01:0.1:1)	0.05 mL/g	花椰菜	[35]
Yeast and moulds	6 kJ/m ²	葡萄籽提取物	0.1%(m/m)	泡菜	[36]
<i>S. typhimurium</i> 生物被膜	76.41 mJ/cm ²	丁香精油	1.2 mg/mL	不锈钢	[33]

2 紫外线协同抗菌

紫外线 (Ultraviolet Light, UV) 是一种非电离形式的不可见光，是位于可见光和 X 射线之间的电磁光谱中波长为 10~400 nm 光线的总称^[24]。按波长的不同可分为长波紫外线 (UV-A, 315~400 nm)、中波紫外线 (UV-B, 280~315 nm)、短波紫外线 (UV-C, 200~280 nm) 和真空紫外线 (UV-D, 10~200 nm)^[25]。据报道，短波紫外线的杀菌效果最好，可以杀死绝大多数的细菌和病毒^[26]。且其维护和投资成本低、安全无毒、节能、操作简单、容易获得（只需紫外灯就可以），一般用于表面消毒。

紫外线的抗菌机理主要是微生物在紫外线的照射下，同一条 DNA 链上相邻的胞嘧啶和胸腺嘧啶之间发生交联形成嘧啶二聚体。这种交联行为破坏了与 DNA 互补链上的嘌呤碱基对形成氢键，阻碍了 DNA 翻译和复制，导致细胞无法进行正常的复制、繁殖功

能，最终使其死亡而达到杀菌的目的^[27-30]。但紫外线穿透力较低，容易受到食品表面水分以及其他因素的影响^[31]；且不能消除孢子，可能无法有效灭活某些病原体^[30]。故可以通过与一些抗菌剂联用来增大杀菌效果，如表 2 所示。

Park 等^[32]研究了肉桂皮油乳液和 UV-C 联合处理对鲜切红甜菜上的 *L. monocytogenes* 和 *S. typhimurium* 的抗菌活性。发现单独使用肉桂皮乳液处理使 *L. monocytogenes* 和 *S. typhimurium* 的数量分别减少了 0.62 log CFU/g 和 0.97 log CFU/g，仅 UV-C 处理使 *L. monocytogenes* 和 *S. typhimurium* 的数量分别减少了 0.62 log CFU/g 和 0.40 log CFU/g。而联合处理使 *L. monocytogenes* 和 *S. typhimurium* 的数量分别减少了 1.29 log CFU/g 和 1.40 log CFU/g。Silva-Espinoza 等^[33]采用丁香精油和 UV-C 联合灭活 *S. typhimurium* 生物被膜。结果显示单独用丁香精油或 UV-C 处理，可使细菌数目分别减少 1.8 log CFU/cm² 和 2.9 log CFU/cm²，

而协同处理使细菌数目减少了 6.8 log CFU/cm²。由此可知紫外线和植物源抑菌剂的联合处理加剧了细菌的死亡,这是因为协同处理增加了细胞膜的渗透性,造成更多的胞内成分泄露。或精油处理引起的生物被膜结构损伤产生了更平坦的结构,并使嵌入的细胞更容易被 UV-C 杀灭。

3 超高压协同抗菌

超高压技术(Ultrahigh Pressure, UHP)通常是以液体作为压强传递介质,在 100~1 000 MPa 的高压条件下对密封食品进行杀菌的^[37-39]。与热杀菌相比,超

高压技术的主要优点是可以在杀菌的同时,把对食品的味道、质地或营养特性的影响降到最小。目前,该技术已经应用于乳制品、肉类和果蔬类的保鲜中。

超高压杀菌是通过压力对微生物的细胞结构造成不可逆的改变,即破坏细胞壁和细胞膜的完整性,增加细胞膜的通透性,解离蛋白质和核糖体亚单位结构,并使某些酶失活,从而杀死和/或亚致死性损伤细胞^[40]。但是超高压技术对设备成本要求高,单独使用无法彻底杀灭食品中的病原菌。因此,近年来已有许多研究者将其与植物源抑菌剂联合杀菌,并取得了成效,如表 3 所示。

表 3 超高压与植物源抑菌剂联合抗菌实例汇总

Table 3 A summary of the combined antibacterial examples of ultrahigh pressure and plant-derived bacteriostatic agents

抑制对象	超高压处理参数	植物源抑菌剂	抑菌剂使用浓度	食品基质/介质	文献
<i>L. monocytogenes</i>	450 MPa, 10 min	百里酚	1.25 mg/g	干腌火腿	[41]
<i>S. aureus</i>	500 MPa, 5 min	肉桂精油	0.2%(V/m)	大米布丁	[42]
		丁香精油	0.25%(V/m)		
<i>L. monocytogenes</i>	500 MPa, 1 min	基于香菜精油的活性包装	含精油 0.772 mg/cm ²	熟鸡胸肉	[43]
<i>L. monocytogenes</i> , <i>Listeria innocua</i>	600 MPa, 5 min	薄荷精油	0.05%(V/V)	酸奶	[44]
<i>E. coli</i>	300/350/400 MPa, 15 min	山茱萸精油	1.0%(V/m)	碎牛肉	[45]
<i>L. monocytogenes</i>	300 MPa, 20 min, 1 °C	香芹酚	3 mmol	半脱脂乳	[46]
<i>lactic acid and psychrotrophic bacteria, L. innocua</i>	600 MPa, min	香芹酚	200 µg/mL	鸡胸肉	[47]

Pérez-Baltar 等^[41]研究了 UHP (450 MPa, 10 min) 与 1.25 mg/g 百里酚(Thymol, THY)联合使用对切片干腌火腿中 *L. monocytogenes* 的抗菌效果。研究发现分别用 UHP、THY、UHP+THY 处理干腌火腿,在 4 °C 下储藏 30 d 后使 *L. monocytogenes* 减少了 0.28、0.52、1.3 log CFU/g; 在 12 °C 下储藏 30 d 后, *L. monocytogenes* 减少了 0.43、0.76、1.45 log CFU/g。Pérez 等^[42]评估了 UHP 单独或与天然抑菌剂(肉桂精油或丁香精油)联合使用对大米布丁中 *S. aureus* 的杀菌效果。结果表明,单独用精油处理对 *S. aureus* 的活力没有任何影响。单独 UHP 处理可使活细胞减少 2.9 log/g。而 UHP 和肉桂精油或丁香精油联合处理可使活细胞分别降低 4.2 log/g 和 4.7 log/g。Stratakos 等^[43]发现熟鸡胸肉先用含 0.772 mg/cm² 香菜精油的活性膜进行真空包装后,再用 UHP 处理 1 min 可使 *L. monocytogenes* 的数量降低到检测限以下。而单独使用活性膜或 UHP 处理分别减少细菌数目 0.8 log CFU/g 和 1.4 log CFU/g。由此,超高压和植物源抑菌剂的联合处理有效地提高了抗菌效果,这是因为适度加压或短期暴露可能会对细菌细胞造成亚致死损伤,使其更容易受到挥发性强的植物源抑菌剂的影

响,对细胞膜结构造成更大地损伤,进而影响细胞的生理功能。

4 超声波协同抗菌

超声波(Ultrasound)是一种频率在 20 kHz 以上的声波。按频率大小可细分为功率超声(20~100 kHz)、高频超声(100 kHz~1 MHz)和诊断超声(1~500 MHz)三种。其中,功率超声通常用于食品加工中。

超声波杀菌是在空化过程中,超声波产生的气泡破裂,产生高温(约 5 500 °C)和压力(约 50 MPa)的区域。局部的高温 and 高压会破坏微生物的细胞结构(细胞壁或细胞膜),促进水分子水解,分泌具有强氧化性的自由基,导致 DNA 损伤,从而使微生物失活^[48,49]。为提高超声波的抗菌效果,人们尝试将其与抗菌剂联合使用,如表 4 所示。

Guo 等^[50]研究了超声波和百里香精油纳米乳液对 *E. coli* 的协同抗菌作用。仅 US 处理和纳米乳液处理分别减少活菌数 0.62 log CFU/mL 和 4.13 log CFU/mL,联合处理减少了 6.86 log CFU/mL。本人所在的课题组前期将根皮素与超声波技术结合,并构建了杀菌动力学模型,分析了协同杀菌效果^[51]。结果表明 700 W 超

声波和 300 $\mu\text{g/mL}$ 根皮素联合处理能够分别减少 *E. coli* 和 *S. aureus* 6.5 log CFU/mL 和 6.6 log CFU/mL。且联合处理对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的灭活效果分别增效 11.4% 和 6.9%。以上结果也证实了超声波与植物源抑

菌剂的联合处理增大了其抗菌效果, 这是因为联合处理进一步地改变了细菌细胞的形态和内部微观结构, 导致了更严重地细胞膜的完整性损伤、膜通透性增加和细胞内成分泄漏加剧, 最终导致细菌死亡。

表 4 超声波与植物源抑菌剂联合抗菌实例汇总

Table 4 A summary of the combined antibacterial examples of ultrasound and plant-derived bacteriostatic agents

抑制对象	超声波处理参数	植物源抑菌剂	抑菌剂使用浓度	食品基质/介质	文献
<i>E. coli</i>	20 kHz, 191 W/cm ² , 9 min	百里香精油纳米乳液	0.375 mg/mL	-	[50]
<i>E. coli, S. aureus</i>	700 W, 5 min	根皮素	300 $\mu\text{g/mL}$	苹果汁	[51]
<i>L. monocytogenes, S. typhimurium</i>	24 kHz, 400 W, 15 min	肉桂精油	0.625 $\mu\text{L/mL}$	牛奶	[52]
<i>E. coli</i>	26 kHz, 200 W, 5 min (连续处理、2 s 开/8 s 关)	牛至精油	0.025%(V/V)	莴苣叶	[53]
<i>Salmonella enterica</i>	26 kHz, 200 W, 5 min (2 s 开/8 s 关)	牛至精油或百里香精油	0.018%(V/V)	莴苣叶	[54]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24 kHz, 33.31 W/ML, 30 min, 50 $^{\circ}\text{C}$	肉桂叶精油	650 $\mu\text{g/mL}$	橙汁	[55]
<i>S. cerevisiae</i>	24 kHz, 33.31 W/ML, 30 min, 50 $^{\circ}\text{C}$	肉桂叶精油	0.02 mg/mL	橙汁、石榴汁	[56]
<i>E. coli, L. innocua</i>	40 kHz, 180 W, 7.5 min	香草醛	1.25 mg/mL	草莓汁	[57]

5 结果与展望

本综述总结了几种常见的冷杀菌技术与植物源抑菌剂联合使用在食品中的灭菌效果。与单一技术相比, 联合处理在对抗微生物方面表现出了协同增效作用。其协同机制可总结为: 冷等离子体通过对菌体细胞膜、胞内蛋白质及 DNA 造成损伤, 产生杀菌作用; 紫外线通过阻碍 DNA 的复制来达到杀菌的目的; 超高压和超声波主要是破坏细胞膜的功能来造成微生物失活。这些冷杀菌技术破坏了细胞膜的完整性, 导致通透性增加, 造成膜功能丧失。抗菌剂利用膜通透性的瞬间变化进入细菌细胞或穿过生物被膜, 并利用其疏水性在细菌细胞质膜中积累, 在那里可以引起多种毒性作用。即物理技术可以破坏菌体细胞膜, 使通透性增加, 有利于植物源抑菌剂更好地发挥作用; 植物源抑菌剂(如精油)可增加细菌对物理杀菌处理的敏感性, 从而降低其使用功率或处理时间。这两者形成良好的优势互补。与未处理组相比, 协同处理延长了食品保质期, 对食品的色泽、味道、外观无不良影响。这为食品保鲜问题提供了一个新的研究方向。

然而, 冷杀菌技术与植物源抑菌剂的联合抗菌研究方面尚有以下不足, 仍需学者们在未来的研究加以改进:

(1) 由食源性致病菌引起的食品腐败和生物被膜形成是食品工业面临的严重问题。据研究显示, 生物被膜内的细菌比浮游菌有更强的抗逆性。然而, 在目前的研究中, 大多数学者侧重于关注联合处理对抗浮游菌的效果, 希望学者们在未来也可以关注食源性致

病菌生物被膜的防控研究。

(2) 国内外对于协同处理的抗菌研究尚处于初级阶段, 目前的协同方法主要有两种: 经过物理方法处理后再在抑菌剂中浸泡、先在抑菌剂中浸泡再进行物理方法处理。但是, 这些物理技术常常伴随着很大的能量, 其是否会改变抑菌剂的化学结构、稳定性进而提高抑菌剂的生物活性犹未可知。希望在未来的几年, 可以有更多的学者从化学结构层面、基因层面、代谢变化层面等多维度来研究抗菌机制, 为进一步开发高效的抗菌技术提供了理论基础。

(3) 目前, 大多数研究者是通过对比单一技术和联合作用后残存的微生物数量变化来评估协同作用的。这种方法仅能评估实验条件下的协同作用效果, 无法像数学建模一样预测非实验条件下的协同作用效果。未来的学者们也可以开发具有预测协同作用杀伤力的数学模型来扩大或优化协同作用, 在获得更高食品品质的同时, 提高食品安全, 为评估协同作用效果提供理论支持。

(4) 植物源抑菌剂的低水溶性、易挥发性和不稳定性限制了其在食品工业中的应用。为提高其抗菌性能和生物利用率, 可采用包封技术, 将精油制备成装载精油的壳聚糖纳米粒子、或在精油中添加表面活性剂, 将其制备成乳液、或做成精油基活性包装。此外, 还可将抗菌剂以纤维膜、包合物、涂膜等多种形式应用于食品或食品包装中。未来学者们也可以关注多元形式的植物源抑菌剂与冷杀菌技术在食品工业中联合使用, 判断哪种形式的植物源抑菌剂可以与冷杀菌技术发挥最大功效。

(5) 目前的研究中, 都是人为接种目标菌种在食品基质或食品材料表面, 然而, 在真正的生产生活中, 微生物的生长会受到许多因素的影响, 如食品基质种类、食品中的营养成分、生长环境、其它微生物的促进/拮抗作用等。将新型抗菌技术应用到食品工业中, 还需进一步扩大规模、探讨适合工业生产条件的处理参数。此外, 无论哪种抗菌技术作用在食品基质上, 都应考虑消费者的直观感受。在未来的研究中, 研究者们也应综合感官评价、食品的理化性质、营养成分、抗菌效果等多种因素来进一步优化技术处理参数, 以期取得更好的使用效果。

参考文献

- [1] Lin L, Liao X, Cui H. Cold plasma treated thyme essential oil/silk fibroin nanofibers against *Salmonella typhimurium* in poultry meat [J]. Food Packaging & Shelf Life, 2019, 21: 100337.
- [2] 杜梦茹. 大气压低温等离子体协同水溶性纳米氧化锌杀灭金黄色葡萄球菌的机制研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [3] Muraca P, Stout J E, Yu V L. Comparative assessment of chlorine, heat, ozone, and UV light for killing *Legionella pneumophila* within a model plumbing system [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, 53 (2): 447-453.
- [4] Pedrosa G, Pimentel T C, Gavahian M, et al. The combined effect of essential oils and emerging technologies on food safety and quality [J]. LWT - Food Science & Technology, 2021, 147: 111593.
- [5] Coutinho N M, Silveira M R, Rocha R S, et al. Cold plasma processing of milk and dairy products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 56-68.
- [6] 张关涛, 张东杰, 李娟, 等. 低温等离子体技术在食品杀菌中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 1-10.
- [7] 曹丽娜, 章建浩, 王晓婷, 等. 高压电场低温等离子体对槟榔包装产品冷杀菌效能特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 133-139, 193.
- [8] 李玉鹏, 王世清, 肖军霞, 等. 低温射频等离子体降解农产品中黄曲霉毒素 B₁ 效果的研究[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(5): 54-57.
- [9] 杜黎, 陈定, 李俊, 等. 冷等离子体处理去除大豆油中黄曲霉毒素 B₁ 的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13): 5314-5321.
- [10] 刘胜男, 马云芳, 张嵘, 等. 大气压冷等离子体影响食品酶研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 254-257.
- [11] 孙潇, 张月婷, 张花利, 等. 等离子体在食品杀菌中的研究现状与展望[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(6): 46-50.
- [12] Liao X, Liu D, Xiang Q, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review [J]. Food Control, 2017, 75: 83-91.
- [13] Fernández A, Noriega E, Thompson A. Inactivation of *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology [J]. Food Microbiology, 2013, 33(1): 24-29.
- [14] Yoo J H, Baek K H, Heo Y S, et al. Synergistic bactericidal effect of clove oil and encapsulated atmospheric pressure plasma against *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* and its mechanism of action [J]. Food Microbiology, 2021, 93: 103611.
- [15] Cui H, Wu J, Li C, et al. Promoting anti-listeria activity of lemongrass oil on pork loin by cold nitrogen plasma assist [J]. Journal of Food Safety, 2017, 37(2): e12316.
- [16] Liu Y Q, Yu L, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2004, 65(2): 143-148.
- [17] 马翠霞. 冷等离子体与丁香精油纳米纤维对蔬菜表面大肠杆菌 O157:H7 生物膜的协同抗菌作用[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [18] Cui H, Li W, Li C, et al. Synergistic effect between *Helichrysum italicum* essential oil and cold nitrogen plasma against *Staphylococcus aureus* biofilms on different food-contact surfaces [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(11): 2493-2501.
- [19] Cui H, Ma C, Lin L. Synergetic antibacterial efficacy of cold nitrogen plasma and clove oil against *Escherichia coli* O157:H7 biofilms on lettuce [J]. Food Control, 2016, 66: 8-16.
- [20] Cui H, Ma C, Li C, et al. Enhancing the antibacterial activity of thyme oil against *Salmonella* on eggshell by plasma-assisted process [J]. Food Control, 2016, 70: 183-190.
- [21] Kim H J, Yong H I, Park S, et al. Effect of atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma on the biological activity of naringin [J]. Food Chemistry, 2014, 160: 241-245.
- [22] Matan N, Puangjinda K, Phothisuwan S, et al. Combined antibacterial activity of green tea extract with atmospheric radio-frequency plasma against pathogens on fresh-cut dragon fruit [J]. Food Control, 2015, 50: 291-296.
- [23] Lin L, Liao X, Li C, et al. Cold nitrogen plasma modified cuminaldehyde/ β -cyclodextrin inclusion complex and its application in vegetable juices preservation [J]. Food Research International, 2021, 141(8): 110132.

- [24] Barroug S, Chaple S, Bourke P. Combination of natural compounds with novel non-thermal technologies for poultry products: A review [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 628723.
- [25] 洪雅敏,朱庆庆,刘清,等.紫外线在果蔬保鲜方面的研究进展[J].*中国野生植物资源*,2017,36(4):50-52,59.
- [26] 黄镜如.紫外线结合涂膜处理对鲜切萝卜贮藏品质的研究[D].天津:天津商业大学,2019.
- [27] Gómez P L, Alzamora S M, Castro M A, et al. Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behavior [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(1): 60-70.
- [28] Manzocco L, Da Pieve S, Maifreni I M. Impact of UV-C light on safety and quality of fresh-cut melon [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12(1): 13-17.
- [29] 陈小媛.紫外杀菌技术在乳制品灭菌工艺中应用研究进展[J].*建筑工程技术与设计*,2020,19:222.
- [30] Delorme M M, Guimarães J T, Coutinho N M, et al. Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102: 146-154.
- [31] 王佳宇,胡文忠,于皎雪,等.紫外线杀菌技术在鲜切果蔬保鲜中的应用研究进展[J].*包装工程*,2021,42(13):85-92.
- [32] Park J-B, Kang J-H, Song K B. Combined treatment of cinnamon bark oil emulsion washing and ultraviolet-C irradiation improves microbial safety of fresh-cut red chard [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2018, 93: 109-115.
- [33] Silva-Espinoza B A, Palomares-Navarro J J, Tapia-Rodriguez M R, et al. Combination of ultraviolet light-C and clove essential oil to inactivate *Salmonella typhimurium* biofilms on stainless steel [J]. *Journal of Food Safety*, 2020, 40(3): e12788.
- [34] Vurmaz A K, Gündüz G T. Inhibition of mold growth on the surface of dried persimmons using combined treatments of UV-C light and clove oil [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 61: 102336.
- [35] Tawema P, Han J, Vu K D, et al. Antimicrobial effects of combined UV-C or gamma radiation with natural antimicrobial formulations against *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7, and total yeasts/molds in fresh cut cauliflower [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2016, 65: 451-456.
- [36] Choi E J, Park H W, Yang H S, et al. Effects of combined treatment with ultraviolet-C irradiation and grape seed extract followed by supercooled storage on microbial inactivation and quality of dongchimi [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2017, 85: 110-120.
- [37] 姜雪,于鹏,肖杨,等.天然抑菌剂与超高压协同作用的研究进展[J].*食品科技*, 2016, 41(2):296-299.
- [38] 张根生,吕云雄,遇世友,等.超高压处理对鸡全蛋液杀菌效果和品质的影响[J].*包装工程*,2020,41(5):74-82.
- [39] 巩雪,常江,李丹婷.超高压保鲜包装技术的研究进展[J].*包装工程*,2014,35(3):97-101,111.
- [40] Marcos B, Jofré A, Aymerich T, et al. Combined effect of natural antimicrobials and high pressure processing to prevent *Listeria monocytogenes* growth after a cold chain break during storage of cooked ham [J]. *Food Control*, 2008, 19 (1): 76-81.
- [41] Pérez-Baltar A, Serrano A, Bravo D, et al. Combined effect of high pressure processing with enterocins or thymol on the inactivation of *Listeria monocytogenes* and the characteristics of sliced dry-cured ham [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 12(2): 288-297.
- [42] Pulido R P, Árbol J T D, Burgos M J G, et al. Bactericidal effects of high hydrostatic pressure treatment singly or in combination with natural antimicrobials on *Staphylococcus aureus* in rice pudding [J]. *Food Control*, 2012, 28(1): 19-24.
- [43] Stratakos A C, Delgado-Pando G, Linton M, et al. Synergism between high-pressure processing and active packaging against *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat chicken breast [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 27: 41-47.
- [44] Evrendilek G A, Balasubramaniam V M. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Listeria innocua* in yogurt drink applying combination of high pressure processing and mint essential oils [J]. *Food Control*, 2011, 22(8): 1435-1441.
- [45] Chien S-Y, Sheen S, Sommers C, et al. Combination effect of high-pressure processing and essential oil (*Melissa officinalis* extracts) or their constituents for the inactivation of *Escherichia coli* in ground beef [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2019, 12(3): 359-370.
- [46] Karatzas A K, Kets E, Smid E J, et al. The combined action of carvacrol and high hydrostatic pressure on *Listeria monocytogenes* Scott A [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 90(3): 463-469.
- [47] Ramos, Mendes E, Oliveira C D, et al. Phenolic carvacrol as a natural additive to improve the preservative effects of high pressure processing of low-sodium sliced vacuum-packed turkey breast ham [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2015, 64(2): 1297-1308.

- [48] Chen F, Zhang M, Yang C. Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 63: 104953-104953.
- [49] Chemat F, Zill-e-Huma, Khan M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 813-835.
- [50] Guo M, Zhang L, He Q, et al. Synergistic antibacterial effects of ultrasound and thyme essential oils nanoemulsion against *Escherichia coli* O157:H7 [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 66: 104988.
- [51] 史长政. 根皮素抑制单增李斯特菌生物膜机理及联合超声杀菌技术研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
- [52] Mortazavi N, Aliakbarlu J. Antibacterial effects of ultrasound, cinnamon essential oil, and their combination against *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* in milk [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(12): 3700-3706.
- [53] Millan-Sango D, McElhatton A, Valdramidis V P. Determination of the efficacy of ultrasound in combination with essential oil of oregano for the decontamination of *Escherichia coli* on inoculated lettuce leaves [J]. *Food Research International*, 2015, 67: 145-154.
- [54] Millan-Sango D, Garroni E, Farrugia C, et al. Determination of the efficacy of ultrasound combined with essential oils on the decontamination of *Salmonella* inoculated lettuce leaves [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2016, 73: 80-87.
- [55] Marta S R, Amaury T R, Rita C R, et al. Combined use of thermo-ultrasound and cinnamon leaf essential oil to inactivate *Saccharomyces cerevisiae* in culture broth and natural orange juice [J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2018, 55: 4623-4633.
- [56] S á nchez-Rubio M, Taboada-Rodr í guez A, Cava-Roda R, et al. Combined use of thermo-ultrasound and cinnamon leaf essential oil to inactivate *Saccharomyces cerevisiae* in natural orange and pomegranate juices [J]. *LWT - Food Science & Technology*, 2016, 73: 140-146.
- [57] Cassani L, Tomadoni B, Ponce A, et al. Combined use of ultrasound and vanillin to improve quality parameters and safety of strawberry juice enriched with prebiotic fibers [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(8): 1-12.