

植物精油结合非热杀菌技术在肉品中应用的研究进展

石冬雪, 韩 格, 刘 骞, 陈 倩, 孔保华*
(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 植物精油是从植物中提取的天然成分, 可以有效抑制微生物生长, 但过高的用量会损害食品的感官质量。新兴非热杀菌技术的应用可以抑制微生物生长, 但高强度的物理技术可能会影响产品品质。研究发现, 将植物精油和非热技术结合, 可以减少精油用量、降低非热技术加工功率、缩短处理时间。本文就植物精油与冷等离子体、高压和辐照3种非热技术相结合应用于肉制品中的方法进行探讨, 并对其细菌生长的抑制效果和机制进行阐述, 为进一步研究植物精油与非热杀菌技术在肉类产品中的协同作用及推广提供一定的理论依据。

关键词: 植物精油; 微生物; 非热技术; 协同作用; 肉品保鲜

Progress in the Application of Plant Essential Oil Combined with Non-Thermal Sterilization Techniques in the Preservation of Meat Products

SHI Dongxue, HAN Ge, LIU Qian, CHEN Qian, KONG Baohua*
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Essential oils, natural ingredients extracted from plants, can effectively inhibit the growth of microorganisms, but their excessive use may damage the sensory quality of food. The application of new non-thermal sterilization technologies can inhibit the growth of microorganisms, but high-intensity physical technologies may affect the quality of products. It has been proved that the combination of plant essential oils and non-thermal technologies can reduce the use of essential oils, reduce the power of non-thermal technologies and shorten the processing time. In this paper, the application of plant essential oils combined with cold plasma, high pressure processing or irradiation in the preservation of meat products is discussed. The inhibition effect and mechanism on bacterial growth are outlined. Hopefully, this review will provide a theoretical basis for the combined application of plant essential oils and non-thermal technologies in the preservation of meat products.

Keywords: plant essential oils; microorganism; non-thermal technologies; synergism; meat products preservation

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220905-111

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 01-0046-07

引文格式:

石冬雪, 韩格, 刘骞, 等. 植物精油结合非热杀菌技术在肉品中应用的研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(1): 46-52.
DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220905-111. <http://www.rlyj.net.cn>

SHI Dongxue, HAN Ge, LIU Qian, et al. Progress in the application of plant essential oil combined with non-thermal sterilization techniques in the preservation of meat products[J]. Meat Research, 2023, 37(1): 46-52. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220905-111. <http://www.rlyj.net.cn>

肉中富含蛋白质、维生素、矿物质和微量元素, 是很多营养素的重要来源, 肉类的多样化营养成分为腐败细菌和常见食源性病原体的生长和繁殖提供了理想环

境。因此, 在肉及肉制品加工生产过程中通过物理或化学技术手段处理可以提高产品质量, 延长其保质期^[1-2]。植物精油是植物中天然存在的低分子质量活性物质的

收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程重大科技专项(2020ZX07B72; 2021ZX12B05)

第一作者简介: 石冬雪(1999—)(ORCID: 0000-0002-9067-8127), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: shidongxue1023@163.com

*通信作者简介: 孔保华(1963—)(ORCID: 0000-0003-3160-8679), 女, 教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: kongbh@163.com

混合物,广泛分布在植物的茎、叶、花、芽、果实、种子等部位,具有很好的抑菌效果。植物精油“天然、绿色、有机”的特点受到消费者的青睐,同时具有高挥发性、可生物降解性等优点,通常用于在食品加工领域代替合成防腐剂^[3]。然而,植物精油具有不耐热性及低水溶性的缺点^[4],在食品基质中难以发挥其生物活性和抑菌效率。此外,在食品体系中为了达到抑菌效果,通常需要高出体外实验时所需植物精油的10~100倍。但当植物精油的浓度超过某个临界值时,就会产生强烈气味,过量加入可能会对食品的感官品质造成不良影响^[5]。另外,植物精油的稳定性也会限制其在食品中的应用^[6]。近年来,许多学者针对植物精油稳定性问题进行了大量研究,已经提出了几种有前景的策略来提高植物精油的稳定性,降低其对食品体系的不良风味影响,包括颗粒封装、纳米乳液、Pickering乳液、多层技术及静电纺丝技术等^[7-12]。

与传统热处理相似,新兴非热杀菌技术可以影响细胞的很多组织,如破坏细胞膜和使蛋白质变性等,从而导致细胞的死亡。不同之处在于新兴非热杀菌技术在一定温度下就可以抑制细菌生长,但是它们对细菌的抑制作用有限^[13]。近年来,国内外许多学者都认为,植物精油与新兴非热杀菌技术相结合,可以减少单一处理时的植物精油用量,以及降低新兴非热杀菌技术的功率,从而进一步增强对细菌的抑制作用,并延长食品保质期^[14]。本文着重阐述植物精油的活性成分和抑菌机制,以及其与冷等离子体、高压及辐照3种物理技术联合使用对肉品品质和细菌生长抑制程度的影响,为植物精油和非热杀菌技术协同处理在肉制品中的应用和推广提供理论参考。

1 植物精油的化学成分及抑菌机制

1.1 植物精油的化学成分

植物精油是由芳香植物的次级代谢物产生的含有多种生物活性物质的混合物,具有挥发性、天然合成的优点,广泛存在于植物的叶、茎、芽、种子、果实、腺体和花中^[15]。植物精油中的挥发性化合物具有多种功能,包括抗菌、杀虫、抗病毒作用,还能够吸引某些昆虫为植物授粉^[10]。植物精油化学成分比较复杂,由碳氢化合物和含氧化合物组成,其中萜烯含量最多,如单萜烯、倍半萜和二萜,而含氧化合物主要包括酚类、醇类、醛类、酮类、酯类和氧化物^[16-17]。天然精油包括牛至精油、肉桂精油、丁香精油、百里香精油等,植物精油主要成分包括百里酚、香芹酚、丁香酚、肉桂醛等,这些成分在可接受的每日摄入量限制下都是安全的。其中,酚类物质,如百里酚、香芹酚、丁香酚等在抗菌及抗氧化方面发挥着重要作用^[5]。

1.2 植物精油的抑菌机制

植物精油化学成分复杂多样,在细菌细胞中没有特定的作用机制。目前,报道最多的抑菌机制之一是植物精油可以增加细胞膜的通透性。植物精油的亲脂性促进了细胞质内成分的扩散和相互作用,导致细胞内容物外渗,从而导致细胞死亡。

植物精油中化学成分不同,对不同的细菌抑菌机制也有差异。Zhang Yunbin等^[18]研究肉桂中提取的精油对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌O157:H7的抗菌活性及作用机制,肉桂精油对大肠杆菌O157:H7的抑制效果低于金黄色葡萄球菌,推测革兰氏阴性菌对植物精油的敏感性低于革兰氏阳性菌。具体来说,植物精油的抗菌作用是一个多靶点作用机制。可以从以下四方面抑制细菌活性^[19]:

1) 植物精油的活性分子作用于细胞壁的主要成分和细胞壁相关的关键酶,从而抑制细胞壁的合成;2) 植物精油通过与细胞膜磷脂分子相互作用,改变细胞膜上脂肪酸的组分和结构,从而增加细胞膜通透性;3) 植物精油通过破坏细菌DNA的结构,抑制其基因表达;4) 植物精油通过影响细菌的呼吸代谢而抑制能量的产生,导致细菌死亡。此外,植物精油还可以通过调节抗氧化酶抑制细胞脂质过氧化,植物精油自身存在的酚类物质也进一步促进自由基的清除、金属离子的螯合及单线态氧淬灭^[20]。因此,植物精油在抗氧化方面也发挥关键作用,有效避免肉及肉制品在加工和贮藏期间由于氧化作用导致颜色和气味的劣变。

2 植物精油结合非热杀菌技术对肉制品品质和保质期的影响

2.1 植物精油与冷等离子体技术的协同作用

等离子体通常被称为物质的第4种状态,它可以由任何中性气体在高电压下电离产生具有正、负电荷的离子、自由电子、自由基、激发或未激发的分子和原子及紫外光子等,整体呈中性^[21]。当电子与其他气体物质处于热力学平衡状态时,等离子体被归类为高温等离子体;当电子与其他气体物质处于非平衡态时,等离子体被归类为低温等离子体,即冷等离子体^[22]。冷等离子体在大气压或低压(真空)条件下获得,它的一个重要特征是能够在接近环境温度(30~60℃)下产生大量化学活性物质,如活性氧和活性氮。其中活性氧是指化学性质活跃的含氧原子或原子团,活性氮是指以一氧化氮为中心的衍生物^[21]。冷等离子体技术应用于肉及肉制品加工是一项创新。冷等离子体对细菌的抑制能力主要取决于工艺中的处理参数,如气体成分、气流、电输入和时间^[23]。然而,冷等离子体产生的活性物质可能会促进肉制品的脂质氧化^[24],植物精油与冷等离子体结合可以减少处理时间、降低对产品品质的不良影响。

2.1.1 植物精油结合冷等离子体技术的抑菌机制

González-González等^[25]假设了植物精油与冷等离子体2项技术结合的灭菌机制。冷等离子体形成的活性成分与细胞中的生物分子之间产生有害的相互作用,导致脂质氧化、蛋白质中氨基酸氧化及DNA结构损伤等^[26]。其次,细菌细胞易受到活性氧强烈攻击,活性氧被吸收到细胞膜表面形成挥发性化合物,即“蚀刻”作用^[22]。“蚀刻”破坏细菌细胞壁和细胞膜,这种破坏现象无法在有限时间内快速修复,最终导致细菌细胞死亡。Sun Yanzhou等^[27]证明冷等离子体破坏了金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的细胞膜。与革兰氏阳性的金黄色葡萄球菌相比,革兰氏阴性的大肠杆菌细胞膜更薄,其细菌活性更容易受到抑制。此外,在冷等离子体应用期间,细胞暴露于冷等离子体产生的电场中,高电荷产生的静电张力会进一步破坏细胞结构。紫外线、光子和活性氧自由基对DNA的共同作用使DNA链断裂形成胸腺嘧啶二聚体,抑制细菌的复制能力^[26]。Yoo等^[28]证明冷等离子体与植物精油协同处理能明显提高抑菌效果,其原因并不是冷等离子体引起了植物精油成分的变化,他们认为植物精油和冷等离子体的联合处理共同导致细菌结构变化,破坏其细胞膜,进一步增加细胞膜的通透性,从而加重细胞内DNA和蛋白质的渗漏。另外,植物精油与冷等离子体技术联合使用时,由于冷等离子体具有“蚀刻”作用,导致细菌细胞膜表面形成电穿孔,使植物精油更容易渗透到细菌细胞中,从而提高对细菌的抑制率。总之,植物精油与冷等离子体协同处理有助于改变冷等离子体单独处理时仅在食品表面发挥抑菌作用的局限性。

2.1.2 植物精油结合冷等离子体的应用及对肉品品质和微生物抑制程度的影响

在实际应用中,考虑到植物精油的不稳定性,常采用一些策略进行封装。例如,Zhu Yulin等^[29]将肉豆蔻中提取的精油用脂质体封装,结合冷等离子体应用于猪肉糜中。此外,将植物精油与其他材料制成可食用复合膜,利用冷等离子体控制植物精油在可食用复合膜中的释放也成为植物精油与冷等离子体联合处理的一种方式上的创新^[30-32]。Qian Jing等^[30]将植物精油加入到肌原纤维蛋白制成可食用复合膜,用于包装牛肉饼,然后将可食用复合膜包装好的牛肉饼进行冷等离子体处理。结果证实冷等离子体的应用促进了植物精油从可食用复合膜中向肉中扩散。Ehsan等^[31]用冷等离子体技术改良含有不同浓度植物精油的壳聚糖-低密度聚乙烯双层膜的性质,并探究双层膜对鸡胸肉片感官品质的影响。Lin Lin等^[32]利用丝素纳米纤维蛋白包埋百里香精油制备活性抗菌包装膜,通过冷等离子体技术改性,结果表明,冷等离子体处理后百里香精油释放量明显提高。

目前已有研究证明植物精油与冷等离子体联合杀菌技术可以有效抑制肉制品中细菌生长。Yoo等^[28]研究植物精油和冷等离子体单独或联合使用对大肠杆菌O157:H7和金黄色葡萄球菌的抑菌作用,结果表明,植物精油或冷等离子体单一处理时,2种细菌减少量小于3.0 (lg (CFU/mL)),而植物精油与冷等离子体联合处理时,2种细菌的减少量超过7.5 (lg (CFU/mL)),证实联合处理具有良好抑菌性。植物精油与冷等离子体联合处理可以降低植物精油浓度、冷等离子体功率,缩短联合处理时间。Cui Haiying等^[33]研究冷等离子体和植物精油对单核细胞增生李斯特菌的协同抗菌作用。结果表明,单独使用植物精油或冷等离子体,达到相近的抗菌效果所需的植物精油浓度及冷等离子体功率更高,植物精油和冷等离子体联合处理所需时间更短、单核细胞增生李斯特菌的失活率更高。此外,植物精油与冷等离子体联合杀菌技术可以延长贮藏期,提高肉类产品品质。Zhu Yulin^[29]、Sahebkar^[34]等分别将植物精油与冷等离子体联合应用到猪肉糜和鸡胸肉的腌料中,产品的脂肪氧化、蛋白质的氧化和降解受到抑制,微观结构、持水能力及黏弹性都得到很好的改善。联合杀菌技术对产品的气味、风味及整体可接受性没有不良影响。因此,冷等离子体与植物精油联合处理抑制了食品中食源性致病菌的生长,降低植物精油浓度和冷等离子体处理功率,缩短处理时间,使加工过程的处理条件更为温和,有利于改善单独处理时产品品质的下降。

2.2 植物精油与高压技术的协同作用

高压是一种常用的非热处理技术,相比于传统的热杀菌方式,高压技术能耗相对较低^[35],因此成为食品加工中的一项新兴杀菌技术。一般来说,在100~800 MPa的压力下能够有效抑制食品中细菌生长,延长食品的保质期^[36]。而对于肉及肉制品这一食品基质,300 MPa以上压力会触发肉的脂质氧化和蛋白质氧化,使肉类的颜色、滋气味变差,从而丧失其营养价值^[37-39]。同时,由于微生物对压力的敏感性不同,部分细菌对压力有很强的耐受性,在较低的压力下可能会引起亚致死性损伤,环境条件适宜时损伤得以修复,这限制了高压技术在食品中的应用^[40]。因此,借助于栅栏效应将高压与植物精油联合,可以有效降低单一处理所需的高压力,并能有效降低对产品品质的不良影响。

2.2.1 植物精油结合高压技术的抑菌机制

细菌对高压的耐受性取决于革兰氏菌的类型、生长阶段、菌株和种类。一般来说,革兰氏阳性菌比革兰氏阴性菌更耐高压,迟缓期细菌细胞比指数生长期细菌细胞更耐高压^[41-42]。高压和植物精油均可破坏细菌细胞结构^[43-44]。与冷等离子体不同,高压主要通过一系列物理化学反应破坏菌体细胞膜,致使内容物外泄,结构被破坏,

同时膜蛋白、核糖体和细胞代谢等均受到高压的作用，从而抑制微生物的生物活性^[45]。高压促使微生物细胞内蛋白质变性，抑制细菌细胞中DNA、RNA或蛋白质合成，从而抑制细胞生长^[46]。高压也可能会改变细胞器，使细胞延长、形成毛孔、释放细胞内成分^[47-48]。徐永霞等^[49]认为，植物精油中的疏水性成分可以使菌体细胞膜的通透性增强，某些醛基能够与细菌中的蛋白质和酶作用，破坏细菌的正常生理代谢，从而达到抑菌效果。姜雪等^[50]认为，超高压与肉桂醛的抑菌机制主要为灭活细菌孢子，而这种结合作用可以提高灭活速率，增强灭菌效果，促进亚致死损伤菌群的过度增生。另外，有研究^[51]表明，高压诱导分子间相互作用的主要靶点是非共价键，不会破坏蛋白质的一级结构，植物精油中具有共价结构的小分子质量物质在经过高压处理后保留下来，并继续发挥其抗菌作用。

2.2.2 植物精油结合高压对肉品品质及微生物抑制程度的影响

高压和植物精油联合处理可应用于抑制生肉中的腐败细菌生长，并缩短高压处理时间、降低高压强度等加工参数。高压和植物精油对生肉中细菌病原体的联合作用如表1所示。

Chien等^[52]在350~400 MPa压力下将几种植物精油混合，并将其应用于新鲜碎牛肉中，使其大肠杆菌数量减少3~6 (lg (CFU/g))。Sheen等^[53]对比高压和反式肉桂醛胁迫对碎鸡肉中的大肠杆菌O157:H7和泌尿致病性大肠杆菌的抗性影响，结果表明，联合处理对2种细菌的抑制效果更佳。高压和植物精油联合处理也用于抑制水产品中细菌的生长。肉桂醛是一种广泛存在于肉桂、茴香、桂皮等天然植物精油中的化合物，徐永霞等^[49]研究肉桂醛、高压及二者联合处理对牙鲆鱼片冷藏期间品质变化的影响，结果表明，植物精油与高压联合处理能显著抑制牙鲆鱼片贮藏过程中细菌生长，其货架期延长约8 d，在贮藏期间对牙鲆鱼片硬度、弹性、咀嚼度等特性无不良影响。Joaquín等^[58]将新鲜三文鱼生鱼片用一种含

有植物精油的明胶-壳聚糖可食用薄膜进行真空包装，随后进行高压处理，该方法可以抑制鱼肉中假单胞菌的增殖，降低鱼肉的脂质氧化，从而延长三文鱼生鱼片的保质期。

2.3 植物精油与辐照技术的协同作用

辐照处理是将食品暴露于电离辐射中，达到抑制细菌生长目的的加工技术。目前食品辐照技术有3种类型：γ射线、X射线和电子束，其中以放射性同位素⁶⁰Co为辐照源的γ射线穿透力较强，对肉类杀菌效果更强^[59]。辐照对肉类食品中致病微生物的生长起到了很好的抑制作用，但是同时也会降低肉类的感官质量。辐照会对肉类风味、色泽、营养及品质产生不利影响，加速脂肪氧化、变色、异味等^[60-61]。为了避免辐照对产品感官品质的不良影响，在实际应用中添加植物精油作为抗氧化剂，可以有效抑制辐射对食品的不良影响。

2.3.1 植物精油结合辐照技术的抑菌机制

γ射线可以直接破坏微生物DNA中的化学键，也可以通过水分解产生活性氧间接破坏细菌细胞膜和染色体^[60]。植物精油和辐照能使细胞膜的完整性发生变化，将细菌细胞内主要成分释放出来，细胞内部ATP含量和pH值降低，从而起到抑菌作用。2项技术联合促进了植物精油中发挥抗菌作用的活性成分与细胞膜之间接触，增加了食品中的细菌失活率^[62]。魏倩倩^[63]对γ射线和肉桂精油联合作用的抑菌机制展开研究，γ射线与植物精油联合处理对菌体细胞外部形态有很大影响，不仅使表面粗糙，而且造成部分细胞外形受损；腐败希瓦氏菌的细胞膜通透性发生变化，其生理活性发生紊乱，γ射线和肉桂精油联合作用效果优于单独使用γ射线或植物精油处理。此外，在联合处理过程中，在腐败希瓦氏菌的影响下，肉桂精油的主要组分肉桂醛被转化成肉桂醇，肉桂醇又发生了进一步转化，涉及到的机制相对复杂，还需深入研究。此外，由于植物精油的不稳定性，在食品中常制备成纳米乳液或薄膜，而辐照可以显著提高薄膜的拉伸强度和模量，并延长活性成分的控释，提高抗菌效果^[64]。

表1 高压和植物精油对生肉中细菌病原体的联合作用

Table 1 Combined effects of high pressure processing and essential oils on the reduction of bacterial pathogens in raw meat

产品	精油或抗菌剂	高压工艺参数	主要成果	参考文献
碎牛肉	柠檬醛	250~400 MPa、10~20 min、4 ℃	400 MPa、1.0%柠檬醛处理15 min，大肠杆菌数量减少5 (lg (CFU/g))	[52]
碎鸡肉	肉桂醛	300~400 MPa、5~25 min、4 ℃	400 MPa、0.50%肉桂醛处理15 min，产志贺毒素大肠杆菌O157:H7减少6.12 (lg (CFU/g))；尿路致病大肠杆菌减少8.41 (lg (CFU/g))；400 MPa、0.07%肉桂醛处理10 min，沙门氏菌减少5.48 (lg (CFU/g))、单核细胞增生李斯特菌减少7.43 (lg (CFU/g))	[53-54]
碎鸡肉	异硫氰酸烯丙酯 (allyl isothiocyanate, AITC)	250~350 MPa、10~20 min、-15~4 ℃	350 MPa、0.15% AITC、4 ℃处理20 min，产志贺毒素大肠杆菌O157:H7减少7.25 (lg (CFU/g))；350 MPa、0.05% AITC、-15 ℃处理20 min，产志贺毒素大肠杆菌O157:H7减少6.38 (lg (CFU/g))	[55]
碎鸡肉	香芹酚	250~450 MPa、10 min、4 ℃	350 MPa、0.60%香芹酚或400 MPa、0.45%香芹酚处理10 min，沙门氏菌和单核细胞增生李斯特菌减少5 (lg (CFU/g))以上	[56]
鸡肉	含有7%~17%肉桂精油的抗菌薄膜	200~300 MPa、10 min、23 ℃	300 MPa、含17%肉桂精油薄膜处理10 min，单核细胞增生李斯特菌和鼠伤寒沙门氏菌数量降低到检测限以下，4 ℃贮藏21 d未观察到受损细胞的恢复	[57]

2.3.2 植物精油结合辐照对肉制品品质及微生物抑制程度的影响

辐照与植物精油联合,增强了对食源性病原菌的抑制程度,在不影响肉品品质的同时降低了辐照剂量。辐照与植物精油联合处理可应用于生肉及加工肉制品中,延长肉及肉制品的保质期。Hu Ziyi等^[65]将壳聚糖-丁香酚与辐照联合使用,使鲜猪肉中金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的减少量超过5 (lg (CFU/g)),延缓了加工过程中的脂肪氧化。Shankar等^[66]将柑橘精油和肉桂精油的混合物与辐照联合使用,将新鲜鱼片的保质期从7 d延长到28 d以上。Quattara等^[67]通过大豆或乳清分离蛋白制备负载不同浓度植物精油的抗菌涂层,与辐照联合处理预煮虾,恶臭假单胞菌减少,保质期至少延长12 d,并且未观察到辐照对感官参数(外观、气味和味道)的不利影响。Huq等^[68]使用植物精油和乳酸链球菌素的微胶囊化抗菌制剂与辐照联合处理即食火腿,在贮存过程中显示出协同抗菌作用,抑制细菌生长的时间长达28 d。Ji Jiali等^[69]用海藻酸盐或海藻酸盐-纤维素纳米晶体封装植物精油,与辐照联合作用于乳酸菌发酵风干肠,抑制了抗性大肠杆菌O157:H7在干燥和酸性条件下的生长,风干肠贮存时间长达20周。

3 结 语

本文主要介绍了植物精油与冷等离子体、高压、辐照3种非热处理技术结合在肉类产品中的实际应用,针对联合处理在肉品中抑制细菌生长、品质改善等方面的影响展开论述。在单独使用植物精油或新兴非热技术处理时,杀菌效果易受到植物精油浓度、非热杀菌技术的工艺条件及处理时间等因素制约,肉及肉制品的微生物抑制程度不彻底,或产品出现蛋白质氧化、脂肪氧化等现象,影响产品质量。植物精油和非热处理结合能有效抑制肉及肉制品中细菌生长,并减少植物精油的用量,降低非热处理技术的工艺强度,从而降低非热技术对肉类产品感官品质和理化特性的不良影响。植物精油与新兴非热技术结合具有广阔的发展前景,以微米或纳米封装的植物精油和非热技术结合的智能包装,有望替代肉类加工贮藏过程中使用的传统常规处理工艺。

参考文献:

- [1] LORENZO J M, SARRIES M V, TATEO A, et al. Carcass characteristics, meat quality and nutritional value of horsemeat: a review[J]. Meat Science, 2014, 96(4): 1478-1488. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.12.006.
- [2] GUTIÉRREZ-DEL-RÍO I, FERNÁNDEZ J, LOMBÓ F. Plant nutraceuticals as antimicrobial agents in food preservation: terpenoids, polyphenols and thiols[J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2018, 52(3): 309-315. DOI:10.1016/j.ijantimicag.2018.04.024.
- [3] FALLEH H, JEMAA M B, SAADA M, et al. Essential oils: a promising eco-friendly food preservative[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127268. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127268.
- [4] SMAOUI S, HSOUNA A B, LAHMAR A, et al. Bio-preservative effect of the essential oil of the endemic *Mentha piperita* used alone and in combination with BacTN635 in stored minced beef meat[J]. Meat Science, 2016, 117: 196-204. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.03.006.
- [5] HYLDGAARD M, MYGIND T, MEYER R. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components[J]. Frontiers in Microbiology, 2012, 3(12): 12. DOI:10.3389/fmicb.2012.00012.
- [6] KHAYYAT S A, ROSELIN L S. Recent progress in photochemical reaction on main components of some essential oils[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2018, 22: 855-875. DOI:10.3389/fmicb.2012.00012.
- [7] ZHANG W, JIANG H, RHIM J W, et al. Effective strategies of sustained release and retention enhancement of essential oils in active food packaging films/coatings[J]. Food Chemistry, 2021, 367: 130671. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130671.
- [8] YOUSUF B, WU S, SIDDQUI M W. Incorporating essential oils or compounds derived thereof into edible coatings: effect on quality and shelf life of fresh/fresh-cut produce[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 108: 245-257. DOI:10.1016/j.tifs.2021.01.016.
- [9] ZHANG L, YU D, REGENSTEIN J M, et al. A comprehensive review on natural bioactive films with controlled release characteristics and their applications in foods and pharmaceuticals[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 112: 690-707. DOI:10.1016/j.tifs.2021.03.053.
- [10] YANG Ruopeng, MIAO Jinyu, SHEN Yuting, et al. Antifungal effect of cinnamaldehyde, eugenol and carvacrol nanoemulsion against *Penicillium digitatum* and application in postharvest preservation of citrus fruit[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141(1): 110924. DOI:10.1016/j.lwt.2021.110924.
- [11] XU Yaoyao, CHU Yifu, FENG Xiao, et al. Effects of zein stabilized clove essential oil Pickering emulsion on the structure and properties of chitosan-based edible films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 111-119. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.04.027.
- [12] ZHANG Liming, YU Dawei, REGENSTEIN J M, et al. A comprehensive review on natural bioactive films with controlled release characteristics and their applications in foods and pharmaceuticals[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 112: 690-707. DOI:10.1016/j.tifs.2021.03.053.
- [13] RYSER E. Stress, sublethal injury, resuscitation, and virulence of bacterial foodborne pathogens[J]. Journal of Food Protection, 2009, 72(5): 1121-1138. DOI:10.1089/cmb.2008.0161.
- [14] DANIEL B, ELISA P, DIEGO G G, et al. Exploiting the synergism among physical and chemical processes for improving food safety[J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 30: 14-20. DOI:10.1016/j.cofs.2018.08.004.
- [15] BAKKALI F, AVERBECK S, AVERBECK D, et al. Biological effects of essential oils: a review[J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46: 446-475. DOI:10.1016/j.fct.2007.09.106.
- [16] KOUTSAVITI A, ANTONOPOULOU V, VLASSI A, et al. Chemical composition and fumigant activity of essential oils from six plant families against *Sitophilus oryzae* (Col: Curculionidae)[J]. Journal of Pest, 2018, 91: 873-886. DOI:10.1007/s10340-017-0934-0.
- [17] BALDIM I, ONANI L, REGINA V, et al. *Lippia sidoides* essential oil encapsulated in lipid nanosystem as an anti-*Candida* agent[J].



- Industrial Crops and Products, 2018, 127: 73-81. DOI:10.1016/j.indcrop.2018.10.064.
- [18] ZHANG Yunbin, LIU Xiaoyu, WANG Yifei, et al. Antibacterial activity and mechanism of cinnamon essential oil against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Food Control, 2016, 59: 282-289. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.05.032.
- [19] 张莲娇. 超声与百里香油纳米乳液协同杀菌机制及其初步应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 1-5. DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.001460.
- [20] RODRIGUEZ-GARCIA I, SILVA-ESPINOZA B A, ORTEGA-RAMIREZ L A, et al. Oregano essential oil as an antimicrobial and antioxidant additive in food products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(10): 1717-1727. DOI:10.1080/10408398.2013.800832.
- [21] 韩格, 陈倩, 孔保华. 低温等离子体技术在肉品保藏及加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 286-292. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180128-387.
- [22] THIRUMDAS R, SARANGAPANI C, ANNAPURE U S. Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing[J]. Food Biophysics, 2015, 10(1): 1-11. DOI:10.1007/s11483-014-9382-z.
- [23] MATAN N, NISOA M, MATAN N. Antibacterial activity of essential oils and their main components enhanced by atmospheric RF plasma[J]. Food Control, 2014, 39: 97-99. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.10.030.
- [24] HARSH B J, UDAY A. Consequences of non-thermal cold plasma treatment on meat and dairy lipids: a review[J]. Future Foods, 2021, 4: 100095. DOI:10.1016/j.fufo.2021.100095.
- [25] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ C R, LABO-POPOOLA O, DELGADO-PANDO G, et al. The effect of cold atmospheric plasma and linalool nanoemulsions against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* on ready-to-eat chicken meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 149(2): 111898. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111898.
- [26] MISRA N N, CHEORUN J. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry[J]. Trends in Food Science and Technology, 2017, 64: 74-86. DOI:10.1016/j.tifs.2017.04.005.
- [27] SUN Yanzhou, QIU Yuchang, NIE Ailing, et al. Experimental research on inactivation of bacteria by using dielectric barrier discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(5): 1496-1500. DOI:10.1109/TPS.2007.905947.
- [28] 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. DOI:10.1016/j.fm.2020.103611.
- [29] ZHU Yulin, LI Changzhu, CUI Haiying, et al. Plasma enhanced-nutmeg essential oil solid liposome treatment on the gelling and storage properties of pork meat batters[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 266(2): 109696.1-109696.8. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.109696.
- [30] QIAN Jing, ZHAO Ying, YAN longfei, et al. Improving the lipid oxidation of beef patties by plasma-modified essential oil/protein edible composite films[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 154: 112662. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112662.
- [31] EHSAN M, MOTAHAREH H M, SEYDEH M H, et al. Prolonging shelf life of chicken breast fillets by using plasma-improved chitosan/low density polyethylene bilayer film containing summer savory essential oil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 321-328. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.03.226.
- [32] LIN Lin, XUE Liao, CUI Haiying. Cold plasma treated thyme essential oil/silk fibroin nanofibers against *Salmonella typhimurium* in poultry meat[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 21: 100337. DOI:10.1016/j.fpsl.2019.100337.
- [33] CUI Haiying, WU Juan, LI Changzhu, 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): e12346. DOI:10.1111/jfs.12316.
- [34] SAHEBKAR A, HOSSEINI M, SHARIFAN A. Plasma-assisted preservation of breast chicken fillets in essential oils-containing marinades[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109759. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109759.
- [35] ZHOU Guanghong, XU Xinglian, LIU Yuan. Preservation technologies for fresh meat: a review[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 119-128. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.04.033.
- [36] 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 and Bioprocess Technology, 2019, 12(3): 359-370. DOI:10.1007/s11947-018-2211-5.
- [37] HUANG H W, LUNG H M, YANG B B, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing[J]. Food Control, 2014, 40: 250-259. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.12.007.
- [38] FULLADOSA E, SERRA X, GOU P, et al. Effects of potassium lactate and high pressure on transglutaminase restructured dry-cured hams with reduced salt content[J]. Meat Science, 2009, 82(2): 213-218. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.01.013.
- [39] JUNG S, GHOUL M, DE LAMBALLERIE-ANTON M. Influence of high pressure on the color and microbial quality of beef meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(6): 625-631. DOI:10.1016/S0023-6438(03)00082-3.
- [40] WESCHE A M, GURTLE J B, MARKS B P, et al. Stress, sublethal injury, resuscitation, and virulence of bacterial foodborne pathogens[J]. Journal of Food Protection, 2009, 72(5): 1121-1138. DOI:10.4315/0362-028X-72.5.1121.
- [41] CHUANG S, SHEEN S. High pressure processing of raw meat with essential oils-microbial survival, meat quality, and models: a review[J]. Food Control, 2021, 132: 108529. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108529.
- [42] LIU Y, BETTI M, GANZLE M G. High pressure inactivation of *Escherichia coli*, *Campylobacter jejuni*, and spoilage microbiota on poultry meat[J]. Journal of Food Protection, 2012, 75(3): 497-503. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-11-316.
- [43] DE OLIVEIRA T L C, RAMOS A L S, RAMOS E M, et al. Natural antimicrobials as additional hurdles to preservation of foods by high pressure processing[J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 45(1): 60-85. DOI:10.1016/j.tifs.2015.05.007.
- [44] GAYÁN E, TORRES J A, PAREDES-SABJA D. Hurdle approach to increase the microbial inactivation by high pressure processing: effect of essential oils[J]. Food Engineering Reviews, 2012, 4(3): 141-148. DOI:10.1007/s12393-012-9055-y.
- [45] SHEEN S, CASSIDY J, SCULLEN B, et al. Inactivation of *Salmonella* spp. in ground chicken using high pressure processing[J]. Food Control, 2015, 57: 41-47. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.04.005.
- [46] SILVA J L, OLIVEIRA A C, VIEIRA T C R G, et al. High-pressure chemical biology and biotechnology[J]. Chemical Reviews, 2014, 114(14): 7239-7267. DOI:10.1021/cr400204z.
- [47] RENDUELES E, OMER M K, ALVSEIKE O, et al. Microbiological food safety assessment of high hydrostatic pressure processing: a review[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(5): 1251-1260. DOI:10.1016/j.lwt.2010.11.001.

- [48] 韩格, 秦泽宇, 张欢, 等. 超高压技术对低盐肉制品降盐机制及品质改良的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 312-319. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180521-303.
- [49] 徐永霞, 尹一鸣, 赵洪雷, 等. 肉桂醛协同超高压处理对牙鲆鱼片冷藏期间品质变化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 225-230. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180816-170.
- [50] 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(2): 296-299. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2016.02.056.
- [51] GUPTA R, BALASUBRAMANIAM V M, SCHWARTZ S J, et al. Storage stability of lycopene in tomato juice subjected to combined pressure-heat treatments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(14): 8305-8313. DOI:10.1021/jf101180c.
- [52] CHIEN S, SHEEN S, SOMMERS C, et al. Modeling the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and uropathogenic *E. coli* in ground beef by high pressure processing and citral[J]. Food Control, 2017, 73(B): 672-680. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.09.017.
- [53] SHEEN S, HUANG C Y, RAMOS R, et al. Lethality prediction for *Escherichia coli* O157:H7 and uropathogenic *E. coli* in ground chicken treated with high pressure processing and *trans*-cinnamaldehyde[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(3): 740-749. DOI:10.1111/1750-3841.14059.
- [54] CHUANG S, SHEEN S, SOMMERS C H, et al. Modeling the reduction of *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* in ground chicken meat by high pressure processing and *trans*-cinnamaldehyde[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 139(3): 110601. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110601.
- [55] HUANG C Y, SHIOWSHUH S, CHRISTOPHER, et al. Modeling the survival of *Escherichia coli* O157:H7 under hydrostatic pressure, process temperature, time and allyl isothiocyanate stresses in ground chicken meat[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1871. DOI:10.3389/fmicb.2018.01871.
- [56] CHUANG S, SHEEN S, SOMMERS C H, et al. Survival evaluation of *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* on selective and nonselective media in ground chicken meat subjected to high hydrostatic pressure and carvacrol[J]. Journal of Food Protection, 2019, 83(1): 37-44. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-19-075.
- [57] AHMED J, MULLA M, ARFAT Y A. Application of high-pressure processing and polylactide/cinnamon oil packaging on chicken sample for inactivation and inhibition of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium*, and post-processing film properties[J]. Food Control, 78: 160-168. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.02.023.
- [58] JOAQUÍN GE, ELVIRA L, ÁNGEL M, et al. The effect of the combined use of high pressure treatment and antimicrobial edible film on the quality of salmon carpaccio[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 283: 28-36. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.06.015.
- [59] 李成梁, 靳国锋, 马素敏, 等. 辐照对肉品品质影响及控制研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 271-278. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201621046.
- [60] WARD J F. Mechanisms of radiation action on DNA in model systems: their relevance to cellular DNA[M]//FIELDEN E M, O'NEILL P. The early effects of radiation on DNA. Springer, 1991: 1-16. DOI:10.1007/978-3-642-75148-6_1.
- [61] STEVENSON M H. Nutritional and other implications of irradiating meat[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 1994, 53(2): 317. DOI:10.1079/PNS19940037.
- [62] HOSSAIN F, FOLLETT P, SALMIERI S, et al. Antifungal activities of combined treatments of irradiation and essential oils (EOs) encapsulated chitosan nanocomposite films in *in vitro* and *in situ* conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 295: 33-40. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.009.
- [63] 魏倩倩. γ 射线联合肉桂精油对腐败希瓦氏菌的作用机制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016. DOI:10.27463/d.cnki.gzgyu.2016.000227.
- [64] ZALLAGHI N, AHMADI M. Combined action of *Lavandula angustifolia* miller essential oil and gamma irradiation treatment on some biological aspects of the Mediterranean flour moth *Ephestia kuehniella* (Zeller)[J]. International Journal of Pest Management, 2019, 67(3): 203-215. DOI:10.1080/09670874.2020.1723819.
- [65] HU Ziyi, XIAO Yingping, WANG Bingkui, et al. Combined treatments of low dose irradiation with antimicrobials for inactivation of foodborne pathogens on fresh pork[J]. Food Control, 2021, 125: 107977. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.107977.
- [66] SHANKAR S, DANNEELS F, LACROIX M. Coating with alginate containing a mixture of essential oils and citrus extract in combination with ozonation or gamma irradiation increased the shelf life of *Merluccius* sp. fillets[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100434. DOI:10.1016/j.fpsl.2019.100434.
- [67] QUATTARA B, SABATO S F, LACROIX B. Combined effect of antimicrobial coating and gamma irradiation on shelf life extension of pre-cooked shrimp (*Penaeus* spp.)[J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 68(1/2): 1-9. DOI:10.1016/S0168-1605(01)00436-6.
- [68] HUQ T, KHANH D Y, RIEDL B, et al. Synergistic effect of gamma (γ)-irradiation and microencapsulated antimicrobials against *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat (RTE) meat[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 507-514. DOI:10.1016/j.fm.2014.09.013.
- [69] JI Jiali, SHANKAR S, SALMIERI S, et al. Combined effects of microencapsulated essential oils and γ -irradiation on microbiological and physicochemical properties of dry fermented sausages during ripening and storage[J]. Food Control, 2021, 133: 108624. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108624.