

基于静电纺丝的生物活性物质封装体系及其在食品抑菌包装中的应用进展

任洁¹, 谭中美¹, 田子豪¹, 武高云¹, 刘永辰¹, 王浩¹, 姜瞻梅¹, 马佳歌^{1,*}, 侯俊财^{1,2,*}
(1.东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2.贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 食源性致病菌和腐败微生物污染食品是导致食源性疾病的主要原因之一。因此, 保障食品品质和延长其保质期已成为学者们迫切关注的问题。利用静电纺丝技术封装生物活性物质开发食品抑菌包装是一种保障食品安全的有效方法。本文首先概述了静电纺丝制备食品抑菌包装的基本原理、分类、影响因素和材料, 系统总结了封装在电纺纳米纤维中的生物活性物质及基于静电纺丝的生物活性物质共封装体系。最后论述了封装生物活性物质的电纺纳米纤维在禽畜肉、乳制品和果蔬抑菌包装方面的应用进展, 总结并展望了基于静电纺丝的食品抑菌包装面临的挑战和发展趋势, 旨在为食品工业中利用电纺纳米纤维封装生物活性物质从而有效抑制食源性致病菌和腐败微生物提供理论支撑和参考依据。

关键词: 静电纺丝; 生物活性物质; 封装; 食品抑菌包装

Recent Progress in Bioactive Substance Encapsulation System Based on Electrospinning and Its Application in Antimicrobial Food Packaging

REN Jie¹, TAN Zhongmei¹, TIAN Zihao¹, WU Gaoyun¹, LIU Yongchen¹, WANG Hao¹, JIANG Zhanmei¹, MA Jiage^{1,*}, HOU Juncai^{1,2,*}
(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2. College of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

Abstract: The contamination of foods by foodborne pathogenic and spoilage microorganisms is one of the major causes of foodborne diseases. Therefore, ensuring food quality and extending its shelf life are urgent concerns for researchers. The application of electrospinning technology to encapsulate bioactive substances in antimicrobial food packaging is an effective method to ensure food safety. First, this article reviews the basic principle of electrospinning, the types of electrospinning used for antimicrobial food packaging, the factors influencing electrospinning, and the electrospinning materials used in antimicrobial food packaging. Next, the bioactive substances encapsulated in electrospun nanofibers and the co-encapsulation systems for bioactive substances based on electrospinning are summarized systematically. Finally, we examine recent progress in the application of electrospun nanofibers encapsulating bioactive substances in antimicrobial packaging for meat, dairy products, fruits and vegetables, and we also discuss the challenges and future trends for antimicrobial food packaging based on electrospinning. The aim of this study is to provide theoretical support and a basis for the application of electrospun nanofibers encapsulating bioactive substances to effectively inhibit foodborne pathogens and spoilage microorganisms in the food industry.

Keywords: electrospinning; bioactive substance; encapsulation; antimicrobial food packaging

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240611-071

中图分类号: TS206.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 03-0246-11

引文格式:

任洁, 谭中美, 田子豪, 等. 基于静电纺丝的生物活性物质封装体系及其在食品抑菌包装中的应用进展[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 246-256. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240611-071. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32202062)

第一作者简介: 任洁 (1999—) (ORCID: 0009-0004-7981-103X), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学。

E-mail: renjie0627@163.com

*通信作者简介: 马佳歌 (1993—) (ORCID: 0000-0001-6375-756X), 女, 讲师, 博士, 研究方向为食品科学。

E-mail: jiage_ma@neau.edu.cn

侯俊财 (1975—) (ORCID: 0000-0003-2943-3398), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品科学。

E-mail: jchou@neau.edu.cn

REN Jie, TAN Zhongmei, TIAN Zihao, et al. Recent progress in bioactive substance encapsulation system based on electrospinning and its application in antimicrobial food packaging[J]. Food Science, 2025, 46(3): 246-256. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240611-071. <http://www.spkx.net.cn>

近年来,由食源性致病菌和腐败微生物污染食品引发的食品安全问题频繁发生,给公众健康带来了严重威胁。由于食品中含有丰富的营养物质,在一定环境条件下极易受到食源性致病菌和腐败微生物的污染,进而导致食品腐败变质,保质期缩短,甚至引发食源性疾病^[1]。开发安全有效的食品包装策略在确保食品安全方面起着至关重要的作用。利用静电纺丝技术封装生物活性物质制备的电纺纳米纤维膜具有良好的抑菌性,可有效保护食品免受微生物污染,延长食品货架期,提高食品品质 and 安全性^[2]。在“双碳”战略背景下,电纺纳米纤维膜可利用生物可降解材料制备绿色无污染的食品包装,为实现双碳目标提供了潜在支持^[3]。如图1所示,在2013—2023年期间,Web of Science数据库以“静电纺丝”和“包装”为关键词的发文数量稳步增加。同时,静电纺丝技术应用于食品包装的比例也呈逐年上升的趋势。以Web of Science为数据库,运用VOSviewer文献计量学软件对静电纺丝食品抑菌包装领域的文献关键词进行了汇总并生成关键词共现图(图2),各个关键词间显示出交错复杂的联系。该图说明了在静电纺丝食品抑菌包装领域的文献中,主要包括5个研究领域,分别是静电纺丝制备纳米纤维(黄色区域)、生物活性物质的封装和递送(绿色区域)、食品抑菌包装(蓝色区域)、食品货架期(红色区域)和食品活性包装(紫色区域)。本文首先介绍用于食品包装的静电纺丝的基本原理、分类、影响因素和材料,系统总结封装在电纺纳米纤维中的多种具有抑菌活性的生物活性物质及基于静电纺丝的生物活性物质共封装体系,最后论述封装生物活性物质的电纺纳米纤维在各类食品抑菌包装中的应用进展,并分析静电纺丝食品抑菌包装在食品工业应用方面面临的挑战和未来的发展趋势。

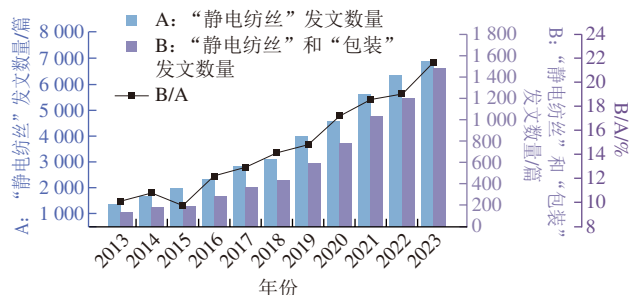


图1 Web of Science数据库中以“静电纺丝”和“包装”为关键词的发文数量(2013—2023)

Fig. 1 Number of articles in the Web of Science database with keywords ‘electrospinning’ and ‘packaging’ (2013–2023)

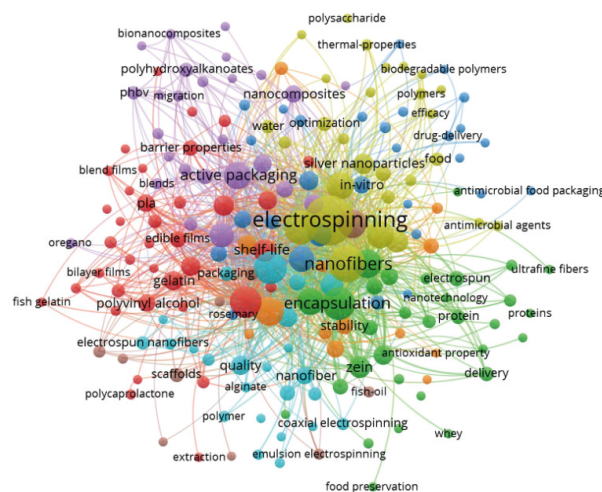


图2 静电纺丝食品抑菌包装领域的文献关键词共现图

Fig. 2 Co-occurrence diagram of literature keywords in the field of food antimicrobial packaging with electrospinning

1 静电纺丝技术概述

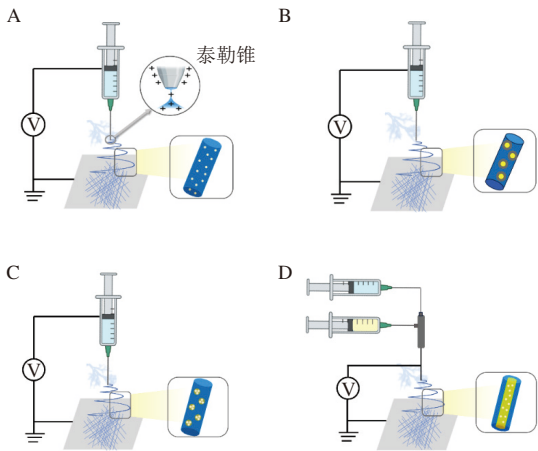
1.1 静电纺丝的基本原理

静电纺丝是一种高效且灵活的制备纳米纤维的非热加工技术。所制备的纳米纤维具有高孔隙率和高比表面积,使其成为封装生物活性物质的理想载体^[4]。静电纺丝仪器主要由4个部分组成,包括高压电源、注射泵、喷丝头和导电收集板。静电纺丝的基本原理是利用高压电场将聚合物溶液生成连续的纳米纤维。在静电纺丝过程中,聚合物溶液以恒定的流速从针头处挤出并形成悬滴。在高压电场作用下,感应电荷会分布在针尖处的液滴表面。当感应电荷间的静电力大于液滴表面张力时,针头处的液滴被拉伸成圆锥形,形成泰勒锥结构并喷出。在喷射过程中,由于射流不稳定的快速振荡,导致溶剂不断挥发,从而迅速固化在接地的导电收集板上形成均匀的电纺纳米纤维膜^[5]。

1.2 用于食品抑菌包装的静电纺丝分类

根据注射器的数量、针头的结构及封装生物活性物质的不同,用于食品包装的静电纺丝可分为单轴静电纺丝、二级载体静电纺丝、乳液静电纺丝和同轴静电纺丝^[6]。单轴静电纺丝是最常见且简单的静电纺丝方法,将生物活性物质直接溶解在聚合物纺丝溶液中,通过一个针头进行静电纺丝以制备具有生物活性的电纺纳米纤维(图3A)^[7]。二级载体静电纺丝是将生物活性物质嵌入环糊精等纳米载体中,然后将其与聚合物溶液混合进行静电纺丝,以实现对生物活性物质的双重保护并提高缓

释效果（图3B）^[8]。乳液静电纺丝是将油包水（W/O）或水包油（O/W）乳液作为纺丝溶液制备核壳电纺纳米纤维的技术（图3C）^[9]。用于静电纺丝的乳液一般由乳化剂稳定的互不相溶的两种液体组成。此外，同轴静电纺丝采用同轴针头输送两种纺丝溶液，也可制备具有核壳结构的电纺纳米纤维（图3D）^[10]。在食品包装方面，具有核壳结构的电纺纳米纤维可以更好地保护生物活性物质，控制其释放速率，以达到长效食品保鲜的目的。单轴静电纺丝操作简单、成本较低，二级载体静电纺丝、乳液静电纺丝和同轴静电纺丝具有较强的结构优势，均受到国内外学者们的广泛研究^[11]。



A~D. 分别为单轴静电纺丝、二级载体静电纺丝、乳液静电纺丝和同轴静电纺丝。

图3 用于食品抑菌包装的静电纺丝分类示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the types of electrospinning used for antimicrobial food packaging

1.3 静电纺丝的影响因素

如表1所示，静电纺丝溶液性质、纺丝工艺参数和环境条件是影响电纺纳米纤维形态和结构的关键因素。

纺丝溶液性质直接影响溶液可纺性，主要包括溶剂类型、聚合物分子质量、聚合物浓度、黏度、电导率和表面张力等。纺丝工艺条件包括电压、进样速率、针头直径和纺丝距离等。环境条件包括湿度、温度和空气流速等^[12]。同时，当纺丝溶液中负载生物活性物质时，应兼顾生物活性物质的结构及其与纺丝溶液的相互作用、纺丝工艺条件和环境条件，从而获得结构和性能更加优异的电纺纳米纤维。

1.4 用于食品抑菌包装的静电纺丝材料

用于食品抑菌包装的静电纺丝材料可分为天然聚合物和合成聚合物^[26]。天然聚合物主要包括蛋白质和多糖，如玉米醇溶蛋白、明胶、壳聚糖、纤维素及其衍生物和普鲁兰多糖等，其具有良好的生物可降解性和生物相容性。然而，部分天然聚合物电纺纳米纤维亲水性较强且机械性能较差，限制了其在食品抑菌包装方面的应用^[27]。合成聚合物主要包括聚乙烯醇（polyvinyl alcohol, PVA）、聚己内酯（polycaprolactone, PCL）和聚乳酸（polylactic acid, PLA）等，具有良好的可纺性和机械性能，可与天然聚合物混合以获得性能优越的食品包装材料^[28]。

2 封装在电纺纳米纤维中的生物活性物质

如图4所示，封装在电纺纳米纤维中的生物活性物质包括植物提取物、抗菌肽和酶、益生菌及金属和金属氧化物。电纺纳米纤维是一种封装和缓释生物活性物质的良好载体，可提高其稳定性和生物利用率（表2）^[29]。与传统的包装材料制备工艺相比，静电纺丝可在常温条件下操作并用于封装热敏性物质。所制备的电纺纳米纤维具有高孔隙率和高比表面积，不仅有利于电纺纳米纤维与食品表面接触，而且为负载的生物活性物质释放提供了理想的条件^[30]。另外，电纺纳米纤维具有热稳定性较高、负载量和包埋率较高、可提高生物活性物质稳定性等功能特性，在食品抑菌包装领域展现出多重优势^[31]。

表1 静电纺丝参数对电纺纳米纤维形态和结构的影响

Table 1 Effects of electrospinning parameters on the morphology and structure of electrospun nanofibers

类别	影响参数	对纤维形态和结构的影响	参考文献
纺丝溶液性质	溶剂类型	溶剂应与聚合物完全相容，高挥发性溶剂可能导致针头堵塞	[13]
	聚合物相对分子质量	相对分子质量高的聚合物溶液可纺性更好，但相对分子质量过高，获得的纤维直径一般较大	[14]
	聚合物浓度	浓度过低可能会产生串珠；浓度过高，黏度会增大，纤维直径随着聚合物浓度的增加而增加	[15]
	黏度	低黏度的溶液不能产生连续的纤维，而高黏度的溶液则不能从针头中喷射出来。在临界值内，随着黏度的增加，液滴和串珠的数量减少，纤维直径增大	[16]
	电导率	在临界值内，溶液的电导率增大，不仅会增加液滴表面的电荷，形成泰勒锥，而且还会导致纤维直径的减小	[17]
	表面张力	表面张力低的纺丝溶液一般产生无串珠的纤维	[18]
纺丝工艺参数	电压	电压过低，纤维会产生串珠；纺丝电压越大，纤维直径越小，当电压达到临界值时，纤维直径随电压增大而增大	[19]
	进样速率	进样速率过高可能导致串珠数量增多和纤维直径增大	[20]
	针头直径	过大或过小的针头直径可能会导致纺丝不稳定	[21]
	纺丝距离	距离过短可能导致纤维直径增加，距离过长可能导致纤维不连续	[22]
环境条件	湿度	湿度过低可能会促进溶剂蒸发而导致射流不稳定；湿度过高可能会增大纤维的直径，并形成多孔纳米纤维	[23]
	温度	温度升高会促进溶剂蒸发，但温度过高可能难以形成连续纤维	[24]
	空气流速	空气流速增大有助于溶剂蒸发，但也可能导致射流不稳定	[25]

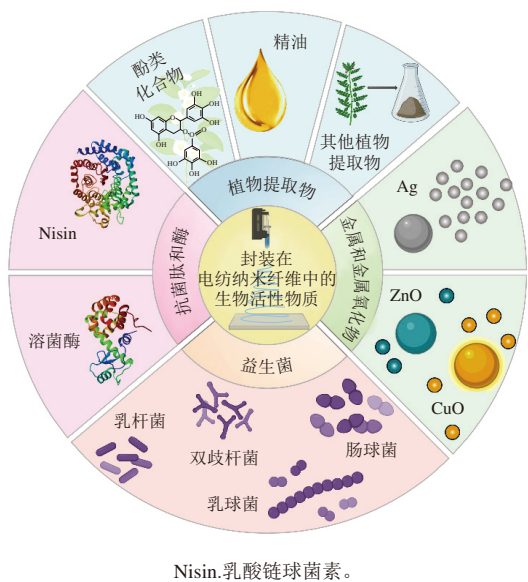


图4 封装在电纺纳米纤维中的生物活性物质
Fig. 4 Bioactive substances encapsulated in electrospun nanofibers

表2 封装在电纺纳米纤维中的生物活性物质
Table 2 Bioactive substances encapsulated in electrospun nanofibers

生物活性物质	纺丝材料	纺丝类型	目标菌	参考文献
酚类化合物	茶多酚	PVA/乙基纤维素	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	[32]
	阿魏酸、槲皮素、没食子酸和原花青素	玉米醇溶蛋白/明胶	—	[33]
	洛神花青素	淀粉/PVA	—	[34]
	茶树精油	羟乙基壳聚糖/PVA	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	[35]
精油	牛至精油	β -环糊精/PLA/PCL	—	[36]
	肉桂醛、柠檬烯或丁香酚	β -环糊精/鱼明胶	总需氧菌、酵母菌和黑曲霉	[37]
	金盏花提取物	PCL/玉米醇溶蛋白/阿拉伯胶	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	[38]
其他植物提取物	灵芝提取物	PCL	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	[39]
	洋葱皮提取物	甘薯淀粉	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	[40]
	石榴皮提取物	聚环氧乙烷/壳聚糖	大肠杆菌	[41]
	Nisin	苋菜分离蛋白/普鲁兰多糖	鼠伤寒沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌和肠膜明串珠菌	[42]
抗菌肽和酶	Nisin	明胶/壳聚糖	单核细胞增生李斯特菌	[43]
	Nisin	普鲁兰多糖/羧甲基壳聚糖/聚氧化乙烯	—	[44]
	细菌素sakacin	玉米醇溶蛋白	单核细胞增生李斯特菌	[45]
	细菌素CMT6	PCL/卵磷脂	副溶血性弧菌	[46]
益生菌	母鸡血清溶菌酶	壳聚糖	金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、福氏链球菌和铜绿假单胞菌	[47]
	溶菌酶	醋酸纤维素	金黄色葡萄球菌	[48]
	鼠李糖乳杆菌、嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌和干酪乳杆菌	普鲁兰多糖/阿拉伯胶	—	[49]
金属和金属氧化物	ZnO NPs	PLA	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	[52]
	Ag ₂ O NPs	PLA	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、黑曲霉和青霉菌	[53]
	嗜酸乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、干酪乳杆菌和鼠李糖乳杆菌	明胶/海藻酸钠	副溶血性弧菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌	[51]

注：—.文献未报道，下同。NPs.纳米粒子（nanoparticles）。

2.1 封装在电纺纳米纤维中的植物提取物

2.1.1 酚类化合物

酚类化合物广泛存在于植物体内，具有抑菌、抗氧化和抗癌等功效^[54]。根据其分子结构，可分为黄酮类、酚酸类、芪类、单宁类、木脂素和香豆素等。酚类化合物可嵌入细菌的细胞膜中，抑制其蛋白质和核酸的合成，从而诱导细菌凋亡样死亡^[55]。酚类化合物的抑菌性易受环境条件的影响，目前，许多研究表明静电纺丝技术能有效包埋多酚，保护其抑菌活性，并实现向食品基质的缓释，达到食品保鲜的目的。Yang Yufan等^[32]制备了负载质量分数5%茶多酚的PVA/乙基纤维素电纺纳米纤维膜，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率分别为88.39%和92.69%，将猪肉货架期延长了3 d。还有研究人员比较了负载4种不同多酚（阿魏酸、槲皮素、没食子酸或原花青素）的玉米醇溶蛋白/明胶电纺纳米纤维膜对樱桃的保鲜效果。在室温条件下贮藏9 d后，含质量分数15%没食子酸或质量分数10%原花青素的纤维膜对樱桃的保鲜效果最好，失水率、硬度和气体释放量等指标都优于对照组^[33]。另外，研究表明，花青素会根据环境pH值的不同呈现不同颜色^[56]。将洛神花青素封装在淀粉/PVA电纺纳米纤维中，制备pH响应型食品抑菌包装。随着pH值的升高，薄膜的颜色由红色变为深绿色，可用于监测猪肉和虾是否变质^[34]。

2.1.2 精油

精油主要由醛类、酚类和含氧萜类化合物组成，包括芳樟醇、蒎烯、丁香酚、伞花烃、百里酚、香芹酮、香芹酚、柠檬醛和柠檬烯等。精油作为一种疏水性天然抑菌剂，能渗透到细菌细胞膜的磷脂双分子层中，破坏细胞膜的正常结构，从而导致细菌死亡。此外，精油中的某些成分可能会渗透到细菌中，并与细菌基因表达的关键成分如酶、转运蛋白或信号分子等结合，从而抑制其生长^[57]。已有研究证实，将精油加入电纺纳米纤维膜中可提高抑菌活性并降低水蒸气透过率。乳化是将精油与水介质混合的重要技术之一，乳液静电纺丝常被应用于精油的封装。Jiang Tiangao等^[35]使用乳液静电纺丝制备的含茶树精油的羟乙基壳聚糖/PVA电纺纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌都具有良好的长期抑菌活性。以往研究常常将精油封装于环糊精中，然后再将其嵌入电纺纳米纤维。如Shi Chong等^[36]以PLA和PCL为基材，制备了负载牛至精油/ β -环糊精包合物的电纺纳米纤维膜，有效延缓了4℃条件下贮藏10 d内黑莓的腐烂变质。也有学者将环糊精与精油直接添加到纺丝溶液中，如Mahmood等^[37]制备了以含有肉桂醛、柠檬烯或丁香酚的 β -环糊精/鱼明胶纺丝溶液为芯层，以鱼明胶为壳层的电纺纳米纤维膜，可有效延长室温条件下面包的货架期。随着环糊精添加量的增加，纳米纤维膜对3种精油的封装

率也逐渐升高,最高为 $(93.20 \pm 1.72)\%$,可能是由于 β -环糊精将精油保护在疏水空腔中以及 β -环糊精与精油之间的相互作用。

2.1.3 其他植物提取物

植物提取物是运用回流提取、超声波提取和微波萃取等方法从全株植物或植物的某一部分提取并加工而成的生物活性物质^[58]。近年来,有关电纺纳米纤维中负载的药食同源植物提取物抑菌效果的研究在不断进行。有研究制备了含体积分数2%金盏花提取物的PCL/玉米醇溶蛋白/阿拉伯胶电纺纳米纤维,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别为 (4.4 ± 1.5) 、 (1.04 ± 0.20) mm^[38]。此外,负载不同浓度灵芝提取物的PCL电纺纳米纤维对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果均较差^[39]。因此,探究不同种类药食同源植物提取物的量效关系对于进一步优化电纺纳米纤维的抑菌性能并扩展其应用至关重要。此外,有学者将农产品加工副产物果皮提取物负载到电纺纳米纤维中,从而制备具有优异抑菌性能的食品包装材料。研究发现,负载洋葱皮提取物的甘薯淀粉超细电纺纳米纤维可有效抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长^[40]。Surendhiran等^[41]以聚环氧乙烷和壳聚糖为基材制备了负载石榴皮提取物的电纺纳米纤维膜,将其用于牛肉保鲜中。于4℃和25℃条件下分别贮存10、7 d后,该纳米纤维膜将大肠杆菌O157:H7活菌数分别减少到2.96、5.80 (lg (CFU/g))。由此可见,植物提取物和静电纺丝技术的结合在食品抑菌包装领域展现出巨大的应用潜力。

2.2 封装在电纺纳米纤维中的抗菌肽和酶

2.2.1 抗菌肽

Nisin是乳酸链球菌产生的代谢产物,由34个氨基酸组成,是目前研究和应用较为成熟的I类细菌素^[59]。Nisin可通过静电相互作用与靶细菌的细胞膜结合,导致细胞膜的通透性增加。Nisin还可能干预细菌的DNA复制和蛋白质合成,进而抑制细菌生长^[60]。许多研究已将Nisin封装在电纺纳米纤维中,可有效抑制引起食品腐败变质的多种革兰氏阳性细菌的生长和繁殖。Soto等^[42]制备了负载Nisin的苋菜分离蛋白/普鲁兰多糖电纺纳米纤维膜,对鼠伤寒沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌和肠膜明串珠菌具有显著的杀菌活性。将含有0.4% Nisin的明胶/壳聚糖混合溶液电纺在PLA流延膜上,可有效抑制单核细胞增生李斯特菌,并将鲑鱼片在4℃条件下保存12 d^[43]。Duan Mengxia等^[44]制备了以普鲁兰多糖为芯层、羧甲基壳聚糖和聚氧化乙烯为壳层的电纺纳米纤维,将自组装方法制备的羧甲基壳聚糖-Nisin纳米凝胶负载到电纺纳米纤维的芯层中,可将鲑鱼的货架期从9 d延长至15 d。此外,一些学者将实验室分离纯化的抗菌肽负载在电纺纳米纤维中。如Heydari-Majd等^[45]制备了负载

细菌素sakacin的玉米醇溶蛋白电纺纳米纤维,封装率为 $(91.50 \pm 1.50)\%$ 。在4℃条件下贮存24 d后,与未包装样品相比,纤维膜可将鹌鹑胸肉表面的单核细胞增生李斯特菌减少约2.8 (lg (CFU/g))。还有学者采用乳液静电纺丝制备了负载细菌素CAMT6的PCL/卵磷脂电纺纳米纤维膜,有效抑制了鲑鱼肉4℃条件下贮藏7 d副溶血性弧菌的生长,减缓其油脂氧化和水分流失^[46]。

2.2.2 酶

溶菌酶广泛存在于动物和植物组织中,可催化水解肽聚糖中N-乙酰胞壁酸和N-乙酰氨基葡萄糖之间的 β -1,4糖苷键,从而破坏细菌的细胞壁^[61]。将溶菌酶和静电纺丝相结合,可制备出具有较强抑菌活性的电纺纳米纤维。Park等^[47]发现,固定化母鸡蛋清溶菌酶的壳聚糖电纺纳米纤维对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、福氏链球菌和铜绿假单胞菌均具有较高的抑制率,分别为82.4%、79.8%、83.4%和84.1%。另外,Wang Peng等^[48]以醋酸纤维素电纺纳米纤维膜为底层,通过逐层自组合法交替沉积溶菌酶和海藻酸钠。在4℃和25℃条件下9层纤维膜将超高温灭菌乳中的金黄色葡萄球菌分别降低了4.89、5.36 (lg (CFU/g)),在乳及乳制品保鲜方面具有广阔的应用前景。

2.3 封装在电纺纳米纤维中的益生菌

益生菌是活的微生物,当摄取足够量时,能对宿主的身体健康发挥有效作用。益生菌在加工和贮藏过程中易受到不利环境胁迫,如氧气、温度、pH值、光照和渗透压等因素,会导致益生菌活力或存活率下降^[62]。将益生菌封装到电纺纳米纤维中,可有效提高益生菌的存活率和对不利环境胁迫的抗性。有研究团队将鼠李糖乳酪杆菌、嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌或干酪乳酪杆菌封装在普鲁兰多糖/阿拉伯胶电纺纳米纤维中,结果发现与冷冻干燥相比,电纺纳米纤维显著提高了益生菌的存活率,最高达97.83%^[49]。基于此,该研究团队还制备了负载鼠李糖乳酪杆菌的PVA/果胶电纺纳米纤维。与普鲁兰多糖/阿拉伯胶电纺纳米纤维相比,在4℃条件下贮存21 d后,该电纺纳米纤维中的益生菌活菌数升高了1.27 (lg (CFU/mL))^[50]。近年来,开发含益生菌的可生物降解的电纺纳米纤维膜作为食品抑菌包装材料备受学者关注。Ghalehjooghi等^[51]将负载嗜酸乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、干酪乳酪杆菌或鼠李糖乳酪杆菌的明胶/海藻酸钠电纺纳米纤维用于鲑鱼片的保鲜。经4℃贮存14 d后,负载嗜酸乳杆菌的纳米纤维膜对副溶血性弧菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌的抑制能力最强。

2.4 封装在电纺纳米纤维中的金属和金属氧化物

金属和金属氧化物纳米粒子是常见的抑菌剂,包括银纳米粒子(Ag NPs)、氧化银纳米粒子

(Ag₂O NPs)、氧化锌纳米粒子(ZnO NPs)和氧化铜纳米粒子(CuO NPs)等。由于金属纳米粒子对人体健康可能有损害,应避免直接接触食物,所以将金属和金属氧化物纳米粒子与电纺纳米纤维相结合引起了学者们的广泛关注。Zhang Rong等^[52]发现负载ZnO NPs的PLA电纺纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的最大抑菌圈直径分别为(21.17±0.07) mm和(18.13±0.08) mm,在延长食品货架期方面具有潜在的应用价值。还有学者制备了负载Ag₂O NPs-大麻纤维的改性PLA电纺纳米纤维膜,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、黑曲霉和青霉菌均具有良好的抑菌活性,可将红葡萄的货架期延长5 d^[53]。

3 基于静电纺丝的生物活性物质共封装体系

为了提高生物活性物质的稳定性和生物利用率,国内外学者设计和开发了一系列的封装系统。然而,大多数的封装系统仅限于装载单一的生物活性物质^[63]。近年来,两种生物活性物质的共封装体系引起了越来越多的关注,如静电纺丝^[64]、乳液^[65]、微胶囊^[66]和水凝胶^[67]等。其中,基于静电纺丝的生物活性物质共封装体系是利用静电纺丝技术封装两种不同比例和剂量的生物活性物质,使其发挥协同抑菌作用(表3)。

表3 基于静电纺丝的生物活性物质共封装体系
Table 3 Co-encapsulation systems for bioactive substances based on electrospinning

生物活性物质	纺丝材料	纺丝类型	目标菌	食品基质	参考文献
槲皮素/植物乳植杆菌	PVA	单轴	假单胞菌/产硫化氢菌	草鱼	[68]
肉桂醛/百里香酚	明胶/玉米醇溶蛋白	单轴	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	草莓	[69]
肉桂醛/豌豆花提取物	PLA	单轴	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	—	[70]
Ag NPs/单宁酸	玉米醇溶蛋白	单轴	金黄色葡萄球菌和大肠杆菌	—	[71]
ZnO NPs/原花青素或没食子酸	玉米醇溶蛋白/明胶	单轴	灰霉菌	—	[72]
ZnO NPs/迷迭香精油	玉米醇溶蛋白/ κ-卡拉胶	单轴	金黄色葡萄球菌和大肠杆菌	—	[73]
ZnO NPs/孜然精油	PCL/明胶	单轴	金黄色葡萄球菌	奶酪	[74]
Nisin/姜黄素	PVA	单轴	总好氧菌和乳酸菌	虹鳟鱼片	[75]
ε-聚赖氨酸/茶多酚	明胶	单轴	大肠杆菌	—	[76]
肉桂精油/溶菌酶	PVA/β-环糊精	二级载体	单核细胞增生李斯特菌、肠炎沙门氏菌、黑曲霉和青霉菌	草莓	[77]
肉桂醛/茶多酚	PLA	同轴	腐败希瓦氏菌	—	[78]
Nisin/没食子酸	壳聚糖/聚氧化乙烯	同轴	单核细胞增生李斯特菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、大肠杆菌和伤寒沙门氏菌	—	[79]
Ag NPs/白藜芦醇	玉米醇溶蛋白/聚氧化乙烯	同轴	金黄色葡萄球菌和大肠杆菌	圣女果	[80]

3.1 基于单轴静电纺丝的生物活性物质共封装体系

利用单轴静电纺丝技术将两种生物活性物质共封装在同一电纺纳米纤维中,不仅提供了一种高效的方法实现生物活性物质的协同抑菌效应,而且在食品抑菌包装领域展现出了巨大的应用潜力。静电纺丝共封装酚类化合物和益生菌可提供潜在的协同抑菌效应,提高其存活

率和抑菌活性。将槲皮素和植物乳植杆菌共封装在PVA单轴电纺纳米纤维中,可显著提高植物乳植杆菌的存活率。在4 ℃条件下贮存12 d后,与箔纸包裹的草鱼样片相比,共封装电纺纳米纤维可将草鱼表面假单胞菌和产硫化氢菌的活菌数分别降低1.56、1.59 (lg (CFU/g))^[68]。有学者共封装两种植物提取物在单轴电纺纳米纤维中,如Wu Xing等^[69]研制了共封装肉桂醛/百里香酚的明胶/玉米醇溶蛋白电纺纳米纤维,对大肠杆菌的抑菌率为67.5%,对金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌的抑菌率为100%,可将室温条件下草莓的保质期延长至7 d。还有学者将肉桂醛和豌豆花提取物共封装在PLA电纺纳米纤维中,对大肠杆菌的抑菌活力显著高于金黄色葡萄球菌^[70]。有研究发现,与仅封装单宁酸的电纺纳米纤维相比,共封装Ag NPs和单宁酸的玉米醇溶蛋白电纺纳米纤维对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌活性更强^[71]。共封装ZnO NPs和其他生物活性物质的单轴电纺纳米纤维也可发挥协同抑菌作用。将原花青素或没食子酸与ZnO NPs共封装在玉米醇溶蛋白/明胶电纺纳米纤维中。ZnO NPs可改变原花青素的结构,并发挥协同抑菌作用,负载ZnO NPs/原花青素的电纺纳米纤维膜对灰霉菌的抑制效果最强^[72]。Amjadi等^[73]制备了含ZnO NPs和迷迭香精油的玉米醇溶蛋白/κ-卡拉胶电纺纳米纤维,具有良好的生物相容性且无细胞毒性,可用于食品包装。还有学者将ZnO NPs和孜然精油加入PCL/明胶电纺纳米纤维中,对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径高达(31.0±2.0) mm,可用于4 ℃条件下奶酪的抑菌保鲜^[74]。

研究表明,Nisin与多酚、精油、植物提取物、有机酸以及其他生物活性物质联合使用的抑菌活性可能高于其单独使用。如Li Qingxiang等^[81]发现Nisin与香芹酚联合处理可在8 h内完全杀灭金黄色葡萄球菌,加速细胞膜的破坏,导致核酸和蛋白质泄漏,抑制生物膜的形成,且能够成功应用于25 ℃条件下巴氏杀菌奶的贮存。在胰酪胨大豆酵母浸膏肉汤和巴氏杀菌奶中,Nisin和芝麻酚联合使用对单核细胞增生李斯特菌的抑制作用高于其单独使用^[82]。Meral等^[75]制备了负载Nisin和姜黄素的PVA基电纺纳米纤维,4 ℃条件下与对照组相比,经该电纺纳米纤维涂层的虹鳟鱼片总好氧菌和乳酸菌分别降低了2.30、3.79 (lg (CFU/g)),并将其保质期延长至12 d。除共封装Nisin和酚类化合物外,Lan Xingzi等^[76]将ε-聚赖氨酸和茶多酚嵌入交联的明胶电纺纳米纤维中,对大肠杆菌的抑菌率高达(91.44±4.75)%,在食品包装领域显示出较大的应用潜力。由此可见,单轴静电纺丝是共封装两种生物活性物质最常见的电纺方式。然而,单轴电纺纳米纤维可能会导致生物活性物质的突释,从而降低其长效抑菌效果^[6]。

3.2 基于二级载体或同轴静电纺丝的生物活性物质共封装体系

由二级载体或同轴静电纺丝共封装两种生物活性物质可减少突释现象的发生,从而提高其生物利用度和长效抑菌性。精油可抑制多种食源性致病菌的生长,是一种天然的、具有芳香气味的广谱抑菌剂。限制精油应用于食品保鲜的主要因素是由于其自身挥发性和不稳定性。Feng Kun等^[77]以PVA制备了负载肉桂精油/溶菌酶/ β -环糊精复合物的电纺纳米纤维膜,对单核细胞增生李斯特菌、肠炎沙门氏菌、黑曲霉和青霉菌均表现出良好的抗菌活性,可有效延长草莓的货架期。肉桂醛是肉桂精油中的主要抑菌成分。肉桂醛和茶多酚作为天然抑菌剂,在食品保鲜领域有广阔的应用前景。有学者采用同轴静电纺丝制备了以肉桂醛和茶多酚为芯层,PLA为壳层的电纺纳米纤维,对腐败希瓦氏菌的抑菌圈直径为 (28.46 ± 0.24) mm,显著增强了抑菌效果^[78]。还有学者将同轴电纺纳米纤维的芯层和壳层分别负载不同的生物活性物质,为实现不同生物活性物质的控制释放提供了可能性。Tajfiroozeh等^[79]以同轴静电纺丝技术将没食子酸和Nisin分别封装在壳聚糖/聚氧化乙烯核壳电纺纳米纤维的芯层和壳层中。负载10%没食子酸/0.07% Nisin的纤维膜对单核细胞增生李斯特菌、枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌等均具有良好的抑菌活性。Jiang Wenlai等^[80]将白藜芦醇封装在聚氧化乙烯/玉米醇溶蛋白核壳电纺纳米纤维的芯层,并将Ag NPs和白藜芦醇封装在其壳层中,可有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长,使室温条件下圣女果的保鲜期延长到12 d。此外,也应进一步探究共封装的生物活性物质与核壳材料间的相互作用,优化电纺工艺参数,以获得性能更加优异的保鲜材料。

4 封装生物活性物质的电纺纳米纤维在食品抑菌包装中的应用

本节主要综述了电纺纳米纤维膜在延长禽畜肉、乳制品和果蔬的品质和货架期方面的部分研究成果。如表4

所示,通过将生物活性物质封装在电纺纳米纤维中,可制备出一系列具有较强抑菌活性的食品包装材料。

4.1 禽畜肉

在禽畜肉的贮存过程中,脂肪和蛋白质的降解是影响其品质和营养价值的重要因素。封装生物活性物质的电纺纳米纤维膜可以提供良好的保护作用,延长食品的保质期,在禽畜肉包装领域具有广阔的应用前景^[93]。PVA的高水溶性限制了其在高水分活度食品中的应用,交联作为一种有效的后处理方式可显著改善电纺纳米纤维的隔水性能和热稳定性。有学者将迷迭香精油或月桂精油封装在经柠檬酸交联的PVA电纺纳米纤维中用于鸡胸肉片保鲜。在4℃条件下贮存7 d后,实验组的单核细胞增生李斯特菌的活菌数均降低了1个对数值以上,pH值、色泽和脂肪氧化率等指标也优于对照组^[83]。还有学者采用同轴静电纺丝制备了以肉桂醛壳聚糖纳米颗粒溶液为芯层、PCL为壳层的电纺纳米纤维膜。与聚乙烯保鲜膜相比,可显著降低4℃条件下贮存12 d内猪肉的微生物含量、pH值和挥发性盐基氮含量^[84]。另外,在4℃条件下,Yilmaz等^[85]用负载丁香酚的明胶电纺纳米纤维膜包裹鲜牛肉,可使得其中的嗜温需氧菌和嗜冷需氧菌分别降低1.62、1.33 (lg (CFU/g)),使鲜牛肉的货架期延长至9 d,这是由于丁香酚中的酚羟基可与细菌细胞膜中的蛋白质和多糖发生反应,破坏其完整性。值得关注的是,封装生物活性物质的电纺纳米纤维对不同类型食源性致病菌和腐败微生物抑菌机制仍有待探索。

4.2 乳制品

乳制品含有许多对人体有益的营养成分,如蛋白质、钙、磷和VD等。这些成分也为微生物的生长提供了良好的环境,特别是一些食源性致病菌,如单核细胞增生李斯特菌、大肠杆菌和沙门氏菌等^[94]。Lin Lin等^[86]发现辣木精油可使单核细胞增生李斯特菌和金黄色葡萄球菌的细菌膜破裂,导致菌体内容物渗漏,制备负载辣木精油-壳聚糖纳米颗粒的明胶基电纺纳米纤维膜用以包裹奶酪。经4℃条件下贮存10 d后,处理组的单核细胞增生李斯特菌和金黄色葡萄球菌的存活率分别降低了

表4 封装生物活性物质的电纺纳米纤维在不同食品抑菌包装中的应用

Table 4 Application of electrospun nanofibers encapsulating bioactive substances in different antimicrobial food packaging						
生物活性物质	纺丝材料	纺丝类型	目标菌	食品基质	应用形式	参考文献
迷迭香精油或月桂精油	PVA	单轴	单核细胞增生李斯特菌	鸡胸肉片	薄膜	[83]
肉桂醛	PCL	同轴	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特菌和肠炎沙门氏菌	猪肉	薄膜	[84]
丁香酚	明胶	单轴	嗜温需氧菌和嗜冷需氧菌	鲜牛肉	薄膜	[85]
辣木精油	明胶	单轴	单核细胞增生李斯特菌和金黄色葡萄球菌	奶酪	薄膜	[86]
迷迭香精油或月桂精油	玉米醇溶蛋白	单轴	单核细胞增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌和嗜温菌	奶酪	可食用膜	[87]
柠檬醛	羟丙基- β -环糊精/玉米醇溶蛋白	二级载体	单核细胞增生李斯特菌	奶酪	薄膜	[88]
茶多酚	PVA/高直链玉米淀粉	单轴	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	草莓	衬垫	[89]
紫菀提取物	玉米醇溶蛋白/PCL	单轴	大肠杆菌和枯草芽孢杆菌	桑葚	衬垫	[90]
肉桂精油	β -环糊精/PVA	二级载体	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	蘑菇	衬垫	[91]
山药多糖	PCL/壳聚糖	单轴	大肠杆菌和金黄色葡萄球菌	圣女果	薄膜	[92]

78.63%和98.67%。Göksen等^[87]将负载迷迭香精油或月桂精油的玉米醇溶蛋白电纺纳米纤维用于奶酪保鲜。在4℃条件下贮存28 d, 纤维膜对单核细胞增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌和嗜温菌均具有显著的抑菌活性。还有学者将柠檬醛/羟丙基- β -环糊精包合物嵌入玉米醇溶蛋白电纺纳米纤维中, 用于4℃条件下奶酪的贮存。与对照组相比, 制得的纤维膜将4种奶酪表面接种的单核细胞增生李斯特菌的数量分别降低了1.39、1.19、1.25 (lg (CFU/g)) 和0.75 (lg (CFU/g))^[88]。由此可见, 奶酪易受到单核细胞增生李斯特菌的污染, 可封装不同类型的生物活性物质制备具有靶向抑菌效果的电纺纳米纤维膜用于不同种类奶酪的保存。

4.3 水果和蔬菜

大部分果蔬中的水分含量较高, 在一定环境条件下容易腐烂变质。有研究表明, 负载生物活性物质的电纺纳米纤维膜可抑制水果和蔬菜中食源性致病菌的生长。由于莓果的果皮较薄, 在运输保鲜过程中易受到损伤。有学者制备了负载茶多酚的PVA/高直链玉米淀粉电纺纳米纤维, 可用于室温条件下6 d内草莓的贮藏保鲜^[89]。Ullah等^[90]将紫菀提取物封装在玉米醇溶蛋白/PCL电纺纳米纤维中, 对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌均有抑制作用, 可用于25℃和相对湿度85%条件下桑葚的采后保鲜。在蔬菜保鲜方面, Pan Jiefeng等^[91]制备了负载肉桂精油/ β -环糊精包合物的PVA电纺纳米纤维, 经纤维膜处理的蘑菇于10℃条件下贮存5 d后色泽和硬度等指标均优于对照组, 可有效延长其货架期。还有学者制备了负载10%山药多糖的PCL/壳聚糖电纺纳米纤维膜, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别为(22.01±1.23) mm和(18.40±0.84) mm, 可有效延缓25℃条件下贮存7 d内圣女果的失水腐烂, 质量损失率为(17.60±0.14)%^[92]。在未来的研究中, 还应加强对纺丝材料、制备工艺和应用形式等的优化, 以减少果蔬在贮运过程中的腐烂和损耗。

5 结 语

近年来, 以生物活性物质和生物聚合物为原料, 利用静电纺丝技术制备新型食品抑菌包装材料成为研究热点。越来越多研究表明, 将植物提取物、抗菌肽、酶、益生菌及金属和金属氧化物等生物活性物质封装在电纺纳米纤维中, 可有效抑制禽畜肉、乳制品和果蔬类食品中的微生物生长, 延长食品货架期。然而, 封装生物活性物质的电纺纳米纤维在食品抑菌包装领域方面的应用仍面临许多挑战。在未来研究中, 可进一步探究如何提高生物活性物质在纺丝过程中的稳定性, 以确保其在电纺纳米纤维中的长效抑菌活性; 其次, 电纺纳米纤维中

负载的生物活性物质与食品基质之间的相互作用机制尚不明确, 需进行充分的安全性评估和毒理学研究, 以确保制得的纳米材料在食品保鲜中应用的安全性; 最后, 目前电纺纳米纤维的研究主要集中在实验室规模, 缺乏实验成果转化和实际食品工业生产的应用, 如何实现大规模生产和应用亟待解决。总之, 静电纺丝技术具有广阔的发展和应用前景, 尤其在提升食品品质和延长货架期方面显示出巨大潜力。随着研究的深入和技术的不断完善, 有望开发出更多安全性高和环境友好型的静电纺丝食品抑菌包装, 为静电纺丝技术在食品保鲜领域的应用提供参考依据。

参考文献:

- [1] THOMAS G A, GIL T P, MÜLLER C T, et al. From field to plate: how do bacterial enteric pathogens interact with ready-to-eat fruit and vegetables, causing disease outbreaks?[J]. Food Microbiology, 2024, 117: 104389. DOI:10.1016/j.fm.2023.104389.
- [2] FONSECA L M, DA CRUZ E P, CRIZEL R L, et al. New advances of electrospun starch fibers, encapsulation, and food applications: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104467. DOI:10.1016/j.tifs.2024.104467.
- [3] SYED M H, KHAN M M R, ZAHARI M A K M, et al. Current issues and potential solutions for the electrospinning of major polysaccharides and proteins: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126735. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.126735.
- [4] SU W Y, CHANG Z Y, E Y Y, et al. Electrospinning and electrospun polysaccharide-based nanofiber membranes: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263: 130335. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.130335.
- [5] LURAGHI A, PERI F, MORONI L. Electrospinning for drug delivery applications: a review[J]. Journal of Controlled Release, 2021, 334: 463-484. DOI:10.1016/j.jconrel.2021.03.033.
- [6] MIN T T, ZHOU L P, SUN X L, et al. Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: a review[J]. Food Chemistry, 2022, 391: 133239. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133239.
- [7] REZAEINIA H, EMADZADEH B, GHORANI B. Electrospun balangu (*Lallemantia royleana*) hydrocolloid nanofiber mat as a fast-dissolving carrier for bergamot essential oil[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105312. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105312.
- [8] WANG Z, ZOU W, LIU L Y, et al. Characterization and bacteriostatic effects of β -cyclodextrin/quercetin inclusion compound nanofilms prepared by electrospinning[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127980. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127980.
- [9] ZHANG C, FENG F Q, ZHANG H. Emulsion electrospinning: fundamentals, food applications and prospects[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 175-186. DOI:10.1016/j.tifs.2018.08.005.
- [10] ZHU Z Z, YU M J, REN R, et al. Thymol incorporation within chitosan/polyethylene oxide nanofibers by concurrent coaxial electrospinning and *in situ* crosslinking from core-out for active antibacterial packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121381. DOI:10.1016/j.carbpol.2023.121381.
- [11] KE Q F, MA K N, ZHANG Y C, et al. Antibacterial aroma compounds as property modifiers for electrospun biopolymer nanofibers of proteins and polysaccharides: a review[J]. International Journal

- of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126563. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.126563.
- [12] ANGEL N, LI S N, YAN F, et al. Recent advances in electrospinning of nanofibers from bio-based carbohydrate polymers and their applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 120: 308-324. DOI:10.1016/j.tifs.2022.01.003.
- [13] KUTZLI I, GRIENER D, GIBIS M, et al. Influence of Maillard reaction conditions on the formation and solubility of pea protein isolate-maltodextrin conjugates in electrospun fibers[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105535. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105535.
- [14] KOREHEI R, KADLA J F. Encapsulation of T4 bacteriophage in electrospun poly(ethylene oxide)/cellulose diacetate fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 100: 150-157. DOI:10.1016/j.carbpol.2013.03.079.
- [15] DROSOU C, KROKIDA M, BILIADERIS C G. Composite pullulan-whey protein nanofibers made by electrospinning: impact of process parameters on fiber morphology and physical properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 726-735. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.11.014.
- [16] 石元玥, 杨宇帆, 孔保华, 等. 静电纺丝技术包埋天然酚类化合物研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 319-327. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200407-092.
- [17] WANG T, SU E Z. Electrospinning meets food packaging: a promising pathway towards novel opportunities in food preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 41: 101234. DOI:10.1016/j.fpsl.2023.101234.
- [18] OKUTAN N, TERZI P, ALTAY F. Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 19-26. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.12.022.
- [19] 邓伶俐, 张辉. 静电纺丝技术在食品领域的应用[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 283-290. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190614-153.
- [20] CUI X Z, YOU Y, DING Y B, et al. Improving the function of electrospun film by natural substance for active packaging application of fruits and vegetables[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115683. DOI:10.1016/j.lwt.2023.115683.
- [21] MA J G, LI T Z, WANG Q Y, et al. Enhanced viability of probiotics encapsulated within synthetic/natural biopolymers by the addition of gum arabic via electrohydrodynamic processing[J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135680. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.135680.
- [22] 徐聪, 李同燮, 钱珊珊, 等. 静电纺丝技术在食品领域应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 370-378. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020020242.
- [23] PELIPENKO J, KRISTL J, JANKOVIĆ B, et al. The impact of relative humidity during electrospinning on the morphology and mechanical properties of nanofibers[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2013, 456(1): 125-134. DOI:10.1016/j.ijpharm.2013.07.078.
- [24] LIAN S J, LAMPROU D, ZHAO M. Electrospinning technologies for the delivery of biopharmaceuticals: current status and future trends[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2024, 651: 123641. DOI:10.1016/j.ijpharm.2023.123641.
- [25] WEN P, ZONG M H, LINHARDT R J, et al. Electrospinning: a novel nano-encapsulation approach for bioactive compounds[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 70: 56-68. DOI:10.1016/j.tifs.2017.10.009.
- [26] VIGNESH V, SETH D, SINGH C N, et al. Electrohydrodynamic encapsulation: a novel technique to enhance the stability of bioactive compounds in food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 151: 104626. DOI:10.1016/j.tifs.2024.104626.
- [27] TOPUZ F, UYAR T. Antioxidant, antibacterial and antifungal electrospun nanofibers for food packaging applications[J]. Food Research International, 2020, 130: 108927. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108927.
- [28] SHEN C Y, YANG Z C, WU D, et al. The preparation, resources, applications, and future trends of nanofibers in active food packaging: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(26): 9656-9671. DOI:10.1080/10408398.2023.2214819.
- [29] ZHANG Y S, MIN T T, ZHAO Y Y, et al. The developments and trends of electrospinning active food packaging: a review and bibliometrics analysis[J]. Food Control, 2024, 160: 110291. DOI:10.1016/j.foodcont.2024.110291.
- [30] ZHAO L Y, DUAN G G, ZHANG G Y, et al. Electrospun functional materials toward food packaging applications: a review[J]. Nanomaterials, 2020, 10(1): 150. DOI:10.3390/nano10010150.
- [31] SHISHIR M R I, XIE L H, SUN C D, et al. Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 34-60. DOI:10.1016/j.tifs.2018.05.018.
- [32] YANG Y F, SHI Y Y, CAO X K, et al. Preparation and functional properties of poly(vinyl alcohol)/ethyl cellulose/tea polyphenol electrospun nanofibrous films for active packaging material[J]. Food Control, 2021, 130: 108331. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108331.
- [33] ZHAO Y X, GUO G P, XU B, et al. Electrospun natural polypeptides based nanofabrics enriched with antioxidant polyphenols for active food preservation[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134991. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134991.
- [34] LV H W, WANG C X, HE D Y, et al. Intelligent food tag: a starch-anthocyanin-based pH-sensitive electrospun nanofiber mat for real-time food freshness monitoring[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256: 128384. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.128384.
- [35] JIANG T G, WANG D, ZHANG X Q, et al. Electrospinning of chitosan/polyvinyl alcohol Pickering emulsion with tea tree essential oil loaded for anti-infection wound dressings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 311: 128561. DOI:10.1016/J.MATCHEMPHYS.2023.128561.
- [36] SHI C, FANG D L, HUANG C B, et al. Active electrospun nanofiber packaging maintains the preservation quality and antioxidant activity of blackberry[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 199: 112300. DOI:10.1016/j.postharvbio.2023.112300.
- [37] MAHMOOD K, KAMILAH H, KARIM A A, et al. Enhancing the functional properties of fish gelatin mats by dual encapsulation of essential oils in β -cyclodextrins/fish gelatin matrix via coaxial electrospinning[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108324. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.108324.
- [38] RAD Z P, MOKHTARI J, ABBASI M. *Calendula officinalis* extract/PCL/zein/gum arabic nanofibrous bio-composite scaffolds via suspension, two-nozzle and multilayer electrospinning for skin tissue engineering[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 530-543. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.05.204.
- [39] NABATI S, AMINZARE M, ROOHINEJAD S, et al. Electrospun polycaprolactone nanofiber containing *Ganoderma lucidum* extract to improve chemical and microbial stability of rainbow trout fillets during storage at 4 °C[J]. Food Control, 2023, 150: 109777. DOI:10.1016/j.foodcont.2023.109777.
- [40] DA CRUZ E P, JANSEN E T, FONSECA L M, et al. Red onion skin extract rich in flavonoids encapsulated in ultrafine fibers of sweet potato starch by electrospinning[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 134954. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134954.

- [41] SURENDRHIRAN D, LI C Z, CUI H Y, et al. Fabrication of high stability active nanofibers encapsulated with pomegranate peel extract using chitosan/PEO for meat preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100439. DOI:10.1016/j.foodpack.2019.100439.
- [42] SOTO K M, HERNÁNDEZ-ITURRIAGA M, LOARCA-PIÑA G, et al. Antimicrobial effect of nisin electrospun amaranth: pullulan nanofibers in apple juice and fresh cheese[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 295: 25-32. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.001.
- [43] GULZAR S, TAGRIDA M, PRODPRAN T, et al. Antimicrobial film based on polylactic acid coated with gelatin/chitosan nanofibers containing nisin extends the shelf life of Asian seabass slices[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100941. DOI:10.1016/j.foodpack.2022.100941.
- [44] DUAN M X, SUN J S, YU S, et al. Insights into electrospun pullulan-carboxymethyl chitosan/PEO core-shell nanofibers loaded with nanogels for food antibacterial packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123433. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.123433.
- [45] HEYDARI-MAJD M, SHADAN M R, REZAEINIA H, et al. Electrospun plant protein-based nanofibers loaded with sakacin as a promising bacteriocin source for active packaging against *Listeria monocytogenes* in quail breast[J]. International Journal of Food Microbiology, 2023, 391: 110143. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110143.
- [46] LI Q B, LIANG W Q, LV L N, et al. Preparation of PCL/lecithin/bacteriocin CAMT6 antimicrobial and antioxidant nanofiber films using emulsion electrospinning: characteristics and application in chilled salmon preservation[J]. Food Research International, 2024, 175: 113747. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113747.
- [47] PARK J M, KIM M, PARK H S, et al. Immobilization of lysozyme-CLEA onto electrospun chitosan nanofiber for effective antibacterial applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 54: 37-43. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2012.11.025.
- [48] WANG P, ZHANG C, ZOU Y C, et al. Immobilization of lysozyme on layer-by-layer self-assembled electrospun films: characterization and antibacterial activity in milk[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106468. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106468.
- [49] MA J G, XU C, YU H L, et al. Electro-encapsulation of probiotics in gum Arabic-pullulan blend nanofibers using electrospinning technology[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106381. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106381.
- [50] XU C, MA J G, WANG W, et al. Preparation of pectin-based nanofibers encapsulating *Lactobacillus rhamnosus* 1.0320 by electrospinning[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107216. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107216.
- [51] GHAALEHJOOGHI H D, TAJIK H, SHAHBAZI Y. Development and characterization of active packaging nanofiber mats based on gelatin-sodium alginate containing probiotic microorganisms to improve the shelf-life and safety quality of silver carp fillets[J]. International Journal of Food Microbiology, 2023, 384: 109984. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109984.
- [52] ZHANG R, LAN W J, JI T T, et al. Development of polylactic acid/ZnO composite membranes prepared by ultrasonication and electrospinning for food packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110072. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110072.
- [53] LIAO M J, PAN Y, FU X W, et al. Electrospun polylactic acid nanofiber film modified by silver oxide deposited on hemp fibers for antibacterial fruit packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126569. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.126569.
- [54] LI S, JIANG S X, JIA W T, et al. Natural antimicrobials from plants: recent advances and future prospects[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137231. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137231.
- [55] CHEN X N, LAN W Q, XIE J. Natural phenolic compounds: antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138198. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.138198.
- [56] FORGHANI S, ZEYNALI F, ALMASI H, et al. Characterization of electrospun nanofibers and solvent-casted films based on *Centaurea arvensis* anthocyanin-loaded PVA/ κ -carrageenan and comparing their performance as colorimetric pH indicator[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 133057. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133057.
- [57] HEMMATI F, BAHRAMI A, ESFANJANI A F, et al. Electrospun antimicrobial materials: advanced packaging materials for food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 520-533. DOI:10.1016/j.tifs.2021.03.014.
- [58] NASTASI J R, KONTOGIORGOS V, DAYGON V D, et al. Pectin-based films and coatings with plant extracts as natural preservatives: a systematic review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 120: 193-211. DOI:10.1016/j.tifs.2022.01.014.
- [59] LIU G R, NIE R, LIU Y S, et al. Combined antimicrobial effect of bacteriocins with other hurdles of physicochemical and microbiome to prolong shelf life of food: a review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 825: 154058. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154058.
- [60] YU W, GUO J Q, LIU Y Y, et al. Fabrication of novel electrospun zein/polyethylene oxide film incorporating nisin for antimicrobial packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 185: 115176. DOI:10.1016/j.lwt.2023.115176.
- [61] CAPPANNELLA E, BENUCCI I, LOMBARDELLI C, et al. Immobilized lysozyme for the continuous lysis of lactic bacteria in wine: bench-scale fluidized-bed reactor study[J]. Food Chemistry, 2016, 210: 49-55. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.04.089.
- [62] ZHUANG X Q, GAUDINO N, CLARK S, et al. Novel lecithin-based oleogels and oleogel emulsions delay lipid oxidation and extend probiotic bacteria survival[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 136: 110353. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110353.
- [63] LIU K, CHEN Y Y, PAN L H, et al. Co-encapsulation systems for delivery of bioactive ingredients[J]. Food Research International, 2022, 155: 111073. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111073.
- [64] HUANG X W, DU L Z, LI Z H, et al. *Lactobacillus bulgaricus*-loaded and chia mucilage-rich gum arabic/pullulan nanofiber film: an effective antibacterial film for the preservation of fresh beef[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131000. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.131000.
- [65] WANG L, YUAN M Y, SUN E Z, et al. Antibacterial food packaging capable of sustained and unidirectional release carvacrol/thymol nanoemulsions for pork preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109169. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.109169.
- [66] YIN M, CHEN L, CHEN M S, et al. Encapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* GG in double emulsions: role of prebiotics in improving probiotics survival during spray drying and storage[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109792. DOI:10.1016/j.foodhyd.2024.109792.
- [67] HU M, LIU G N, ZHANG W, et al. Co-encapsulation of (-)-epigallocatechin-3-gallate and quercetin in double emulsion hydrogel beads: microstructures, functional properties, and digestion

- behaviors[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131427. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131427.
- [68] ZHANG Z L, ZHANG X H, LI Y, et al. Effects of quercetin- and *Lactiplantibacillus plantarum*-containing bioactive films on physicochemical properties and microbial safety of grass carp[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139472. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.139472.
- [69] WU X, LIU Z, HE S, et al. Development of an edible food packaging gelatin/zein based nanofiber film for the shelf-life extension of strawberries[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136652. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136652.
- [70] LIU X X, SONG X S, GOU D J, et al. A polylactide based multifunctional hydrophobic film for tracking evaluation and maintaining beef freshness by an electrospinning technique[J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136784. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136784.
- [71] ZHAN F C, YAN X X, SHENG F, et al. Facile *in situ* synthesis of silver nanoparticles on tannic acid/zein electrospun membranes and their antibacterial, catalytic and antioxidant activities[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127172. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127172.
- [72] YUAN Y, TIAN H F, HUANG R R, et al. Fabrication and characterization of natural polyphenol and ZnO nanoparticles loaded protein-based biopolymer multifunction electrospun nanofiber films, and application in fruit preservation[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135851. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.135851.
- [73] AMJADI S, ALMASI H, GHORBANI M, et al. Reinforced ZnONPs/ rosemary essential oil-incorporated zein electrospun nanofibers by κ -carrageenan[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 232: 115800. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.115800.
- [74] SHANBEHZADEH F, SAEI-DEHKORDI S S, SEMNANI D. Fabrication and characterization of electrospun nanofibrous mats of polycaprolactone/gelatin containing ZnO nanoparticles and cumin essential oil and their anti-staphylococcal potency in white cheese[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101904. DOI:10.1016/j.fbio.2022.101904.
- [75] MERAL R, ALAV A, KARAKAS C, et al. Effect of electrospun nisin and curcumin loaded nanomats on the microbial quality, hardness and sensory characteristics of rainbow trout fillet[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108292. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108292.
- [76] LAN X Z, LUO T T, ZHONG Z X, et al. Green cross-linking of gelatin/tea polyphenol/ ϵ -poly(L-lysine) electrospun nanofibrous membrane for edible and bioactive food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100970. DOI:10.1016/j.fpsl.2022.100970.
- [77] FENG K, WEN P, YANG H, et al. Enhancement of the antimicrobial activity of cinnamon essential oil-loaded electrospun nanofilm by the incorporation of lysozyme[J]. RSC Advances, 2017, 7(3): 1572-1580. DOI:10.1039/C6RA25977D.
- [78] HAN Y, DING J, ZHANG J T, et al. Fabrication and characterization of polylactic acid coaxial antibacterial nanofibers embedded with cinnamaldehyde/tea polyphenol with food packaging potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 739-749. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2021.06.143.
- [79] TAJFIROOZEH F, MORADI A, SHAHIDI F, et al. Fabrication and characterization of gallic-acid/nisin loaded electrospun core/shell chitosan/polyethylene oxide nanofibrous membranes with free radical scavenging capacity and antimicrobial activity for food packing applications[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102529. DOI:10.1016/j.fbio.2023.102529.
- [80] JIANG W L, ZHAO P, SONG W L, et al. Electrospun zein/polyoxyethylene core-sheath ultrathin fibers and their antibacterial food packaging applications[J]. Biomolecules, 2022, 12(8): 1110. DOI:10.3390/biom12081110.
- [81] LI Q X, YU S N, HAN J Z, et al. Synergistic antibacterial activity and mechanism of action of nisin/carvacrol combination against *Staphylococcus aureus* and their application in the infecting pasteurized milk[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132009. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.132009.
- [82] WU M J, DONG Q L, SONG X, et al. Effective combination of nisin and sesamol against *Listeria monocytogenes*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114546. DOI:10.1016/j.lwt.2023.114546.
- [83] GÖKSEN G, FABRA M J, PÉREZ-CATALUÑA A, et al. Biodegradable active food packaging structures based on hybrid cross-linked electrospun polyvinyl alcohol fibers containing essential oils and their application in the preservation of chicken breast fillets[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 27: 100613. DOI:10.1016/j.fpsl.2020.100613.
- [84] XU J M, GAO Y, CHEN W C, et al. Properties of coaxial polycaprolactone cinnamaldehyde chitosan nanoparticles electrospun membrane and its effect on the shelf life of meat[J]. Food Control, 2024, 164: 110555. DOI:10.1016/j.foodcont.2024.110555.
- [85] YILMAZ M T, HASSANEIN W S, ALKABAA A S, et al. Electrospun eugenol-loaded gelatin nanofibers as bioactive packaging materials to preserve quality characteristics of beef[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100968. DOI:10.1016/j.fpsl.2022.100968.
- [86] LIN L, GU Y L, CUI H Y. Moringa oil/chitosan nanoparticles embedded gelatin nanofibers for food packaging against *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* on cheese[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 19: 86-93. DOI:10.1016/j.fpsl.2018.12.005.
- [87] GÖKSEN G, FABRA M J, EKIZ H I, et al. Phytochemical-loaded electrospun nanofibers as novel active edible films: characterization and antibacterial efficiency in cheese slices[J]. Food Control, 2020, 112: 107133. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107133.
- [88] SHEN C, CHEN W Q, LI C Z, et al. Preparation and physicochemical effects of zein nanofiber membrane encapsulated with citral/HP- β -CD inclusion complex and its application on cheese[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 101990. DOI:10.1016/j.fbio.2022.101990.
- [89] CHEN L, WU F, XIANG M, et al. Encapsulation of tea polyphenols into high amylose corn starch composite nanofibrous film for active antimicrobial packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 245: 125245. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.125245.
- [90] ULLAH A, YANG H, TAKEMAE K, et al. Sustainable bioactive food packaging based on electrospun zein-polycaprolactone nanofibers integrated with *Aster yomena* extract loaded halloysite nanotubes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131375. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.131375.
- [91] PAN J F, AI F M, SHAO P, et al. Development of polyvinyl alcohol/ β -cyclodextrin antimicrobial nanofibers for fresh mushroom packaging[J]. Food Chemistry, 2019, 300: 125249. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125249.
- [92] ZANG C, ZHANG Y J, YANG W G, et al. Polycaprolactone/chitosan electrospun nanofibrous membranes loaded Chinese yam polysaccharide for active food packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 198: 115985. DOI:10.1016/j.lwt.2024.115985.
- [93] GOKSEN G, DEMIR D, ECHEGARAY N, et al. New insights of active and smart natural-based electrospun mats for food safety in meat and meat products[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104159. DOI:10.1016/j.fbio.2024.104159.
- [94] QI Y, LI S T, ZHANG Y L, et al. Recent advances in viability detection of foodborne pathogens in milk and dairy products[J]. Food Control, 2024, 160: 110314. DOI:10.1016/j.foodcont.2024.110314.