

豌豆分离蛋白/普鲁兰/大蒜素复合静电纺丝纳米纤维材料的制备及抑菌性

贾惜文^{1,2}, 刘九阳¹, 王静杰¹, 刘 骞¹, 王 浩¹, 孔保华¹, 王 辉^{1,*}

(1.东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2.中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要:以豌豆分离蛋白(pea protein isolate, PPI)和普鲁兰多糖(pullulan, PUL)为原料,大蒜素(allicin, AC)作为抗菌物质,利用静电纺丝技术制备纳米纤维材料。考察AC添加量对纳米纤维的结构特性、形貌特征、直径分布以及抑菌效果的影响。红外光谱结果表明AC被成功包裹在PPI/PUL复合纳米纤维中。扫描电子显微镜显示AC的加入使纳米纤维周围出现大小不等的“球状”结构,且“球状”结构的尺寸随AC添加量增大逐渐增大($P < 0.05$),同时纳米纤维直径呈现逐渐减小的趋势($P < 0.05$)。当AC添加量小于15%时,随着AC添加量增大,复合纳米纤维的弹性模量和拉伸强度逐渐增大($P < 0.05$),断裂伸长率逐渐减小($P < 0.05$)。此外,当AC添加量大于10%时,PPI/PUL/AC复合纳米纤维表现出明显的抑菌效果,其中添加15%和20% AC的PPI/PUL/AC复合纳米纤维抑菌效果最明显,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别高达16.5 mm和12.8 mm。本研究将为新型绿色食品包装纳米材料的开发与应用提供创新性理论依据和技术指导。

关键词:豌豆分离蛋白;普鲁兰多糖;大蒜素;静电纺丝纳米纤维;抑菌性

Fabrication and Antibacterial Performance of Pea Protein Isolate/Pullulan/Allicin Composite Electrospun Nanofibers

JIA Xiwen^{1,2}, LIU Jiuyang¹, WANG Jingjie¹, LIU Qian¹, WANG Hao¹, KONG Baohua¹, WANG Hui^{1,*}

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using pea protein isolate (PPI) and pullulan (PUL) as raw materials and allicin (AC) as an antibacterial substance, nanofiber materials were prepared by electrospinning technology. The influence of allicin concentration on the structural and morphological characteristics, diameter distribution and antibacterial effects of nanofibers were investigated. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) indicated that allicin was wrapped in the composite nanofibers. Scanning electron microscopy (SEM) showed that spherical structures of different sizes appeared around the nanofibers due to the addition of allicin. The size of the spherical structures increased ($P < 0.05$) with an increase in allicin concentration, while the nanofiber diameter gradually decreased ($P < 0.05$). With increasing allicin concentration up to 15%, the elastic modulus and tensile strength of the composite nanofibers gradually increased ($P < 0.05$), and the elongation at break gradually decreased ($P < 0.05$). Additionally, the composite nanofibers with more than 10% allicin exhibited an obvious bacteriostatic effect, and it was strongest at allicin concentrations of 15% and 20%, with inhibition zone diameters of 16.5 and 12.8 mm against *E. coli* and *S. aureus*, respectively. This research will provide data support and a theoretical basis for the development and application of new green food packaging nanomaterials.

Keywords: pea protein isolate; pullulan; allicin; electrospun nanofibers; antibacterial performance

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220602-018

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)16-0121-06

引文格式:

贾惜文, 刘九阳, 王静杰, 等. 豌豆分离蛋白/普鲁兰/大蒜素复合静电纺丝纳米纤维材料的制备及抑菌性[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 121-126. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220602-018. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021C048); 黑龙江省博士后面项目(LBH-Z21007)

第一作者简介: 贾惜文(1994—)(ORCID: 0000-0002-8667-8482), 男, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: xwjia2016@126.com

*通信作者简介: 王辉(1989—)(ORCID: 0000-0003-4809-5638), 女, 讲师, 博士, 研究方向为食品贮藏与保鲜。

E-mail: huiwang@neau.edu.cn

JIA Xiwen, LIU Jiuyang, WANG Jingjie, et al. Fabrication and antibacterial performance of pea protein isolate/pullulan/allucin composite electrospun nanofibers[J]. Food Science, 2023, 44(16): 121-126. (in Chinese with English abstract)
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220602-018. http://www.spkx.net.cn

随着社会发展和人们生活水平的提高,食品安全问题受到越来越多的关注,采用适当的包装可以在一定程度上保证食品的质量安全。然而,传统包装材料难降解甚至不可降解,仅能起到阻隔作用,在改善食品品质、延长货架期方面不具备优势。因此,开发绿色、安全、可降解且能保持食品品质并延长食品货架期的包装材料有助于减少因食品腐败而造成的资源浪费,对我国食品安全建设十分重要。

抗菌包装可通过其含有的抗菌成分抑制或杀灭食品表面微生物,达到延长食品货架期的目的^[1]。抗菌包装形式众多,例如挥发性抗菌包装,此方法虽然便捷,但是抑菌效果一般且对食品具有选择性^[2];涂膜法虽然效果好,但是贮藏期短且要求抗菌剂必须耐高温^[3];化学键合型抗菌包装抗菌剂的释放速度和扩散浓度较低,无法实现较好的抑菌效果^[4]。随着材料科学和纳米技术的迅速兴起,静电纺丝技术制备纳米纤维抗菌材料已经成为近几年的研究热点。

静电纺丝技术具有易于操作、成本低廉、条件温和以及负载量高等诸多优点,是负载抗菌物质制备纳米包装材料的理想方式^[5]。考虑到食品抗菌包装材料的安全性和环境保护问题,天然聚合物如蛋白质和多糖因其具有可食性和易降解等优点成为静电纺丝纳米纤维的理想壁材。豌豆分离蛋白(pea protein isolate, PPI)是一种高附加值的蛋白质资源,具有良好的分散性和稳定性等特征,可与多糖复配用于功能性食品和生物材料领域^[6]。普鲁兰多糖(pullulan, PUL)是一种优异的天然助纺材料,具有良好的黏合性和优异的成膜性^[7]。将PPI与PUL复合可提高电纺溶液的可纺性和成膜性^[8]。

大蒜素(allicin, AC)是大蒜中广泛存在的一种具有抑菌活性的有机硫化物。研究表明AC对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌都具有明显的抑制效果^[9]。AC可以通过与含巯基的酶发生氧化反应或通过抑制生物膜的形成起到抑菌作用^[10]。但是AC稳定性差,容易受到氧化剂、光和热等因素的影响而分解^[11]。而纳米技术可以用来提高AC的稳定性、溶解度及生物利用率^[12]。Wang Yufeng等^[13]研究了AC微胶囊对豆腐、面包、鸡肉和猪肉等常规食品的保鲜效果,结果表明AC负载型微胶囊对这些常规食品的抑菌保鲜效果显著。然而,目前鲜见关于利用静电纺丝技术包覆AC的相关报道。

基于前期工作^[8],本研究利用静电纺丝技术成功制备具有抑菌效果的PPI/PUL/AC复合纳米纤维材料,重点考察AC添加量对纳米纤维结构特性、形貌特征、直径分布以及抑菌效果的影响。制备工艺操作简便、条件温和、

绿色高效,为新型活性食品包装材料的研究与开发提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

PPI(纯度80%) 宿州市皖神面制品有限公司;
PUL(纯度90%) 天津北洋百川生物技术有限公司;
AC(纯度99%) 上海源叶生物有限公司;葡萄糖
国药集团化学试剂有限公司;营养琼脂、营养肉汤
北京奥博星生物技术有限责任公司;供试菌株实验所用菌株分别为大肠杆菌(*Escherichia coli*) ATCC 25922、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*) ATCC 13565,均保存于东北农业大学乳品重点实验室;所用水均为去离子水。

1.2 仪器与设备

DFS-001静电纺丝设备 北京铠为信技术有限公司;
SN-3400场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM) 日本日立有限公司;ALPHA-T傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)仪 德国布鲁克科技有限公司;
TA-Xt plus型质构仪 日本岛津有限公司。

1.3 方法

1.3.1 PPI/PUL/AC复合纳米纤维的制备

称取一定量的PPI和PUL,按照质量比20:80,用蒸馏水(pH 6.91)配制成总聚合物质量分数为22.5%的溶液。然后,将AC加入上述聚合物溶液,AC添加量为5%、10%、15%和20%(基于聚合物溶液的质量),室温(25℃)、500 r/min搅拌2~3 h,得到均一溶液。

使用高压静电纺丝装置制备纳米纤维,具体参数如下:电压18 kV,流速0.4 mL/h,不锈钢针头直径为0.8 mm,接收板到注射器针尖的距离为10 cm,纺丝温度25℃,相对湿度50%。将制备的静电纺丝纳米纤维收集在接收板的锡纸上,35℃真空干燥12 h后备用。具体工艺流程如图1所示。

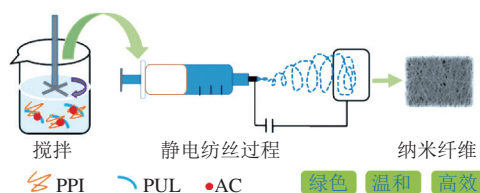


图1 PPI/PUL/AC复合纳米纤维膜的制备工艺

Fig. 1 Preparation process of PPI/PUL/AC composite nanofiber films

1.3.2 PPI/PUL/AC复合纳米纤维红外光谱的测定

为确定纤维组分之间的组成和相互作用,使用FTIR记录纤维的红外光谱数据。光谱扫描范围为4000~600 cm⁻¹,波数分辨率为4 cm⁻¹,扫描次数为16次。

1.3.3 PPI/PUL/AC复合纳米纤维微观形貌的观察

利用SEM观察静电纺丝纳米纤维的形貌结构。参照Jia Xiwen等^[8]的方法,首先将制备的纳米纤维膜样品裁剪成2 mm×3 mm的矩形小片,将其用导电胶粘贴到样品台上,然后进行喷金处理,最后放置于机器中进行样品观察和分析。其中放大倍数为2 000~10 000倍,加速电压5.0 kV,工作距离11.5 mm。另外,采用Image J-Diameter J图像分析软件测量纤维直径。

1.3.4 PPI/PUL/AC复合纳米纤维力学性能测定

参照王博等^[14]的方法利用TA.XT Plus型质构仪对纳米纤维膜的力学性能(弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率)进行测定。将膜样品裁剪为5 cm×2 cm的长方形,设定拉伸强度参数为1 mm/min。用压敏胶带将膜样品固定在拉伸探头(A/SPR)上,按下启动按钮,使探头慢慢将膜向上拉,直至膜断裂。每个膜样品做3个平行。膜拉伸强度按式(1)计算,断裂伸长率按式(2)计算:

$$\text{拉伸强度/MPa} = \frac{F \times 10^{-6}}{S} \quad (1)$$

$$\text{断裂伸长率/\%} = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (2)$$

式中: F 为最大张力/N; S 为伸长距离/mm; L 为膜断裂时标线之间的距离/mm; ΔL 为断裂时膜被拉伸的长度/mm。

1.3.5 PPI/PUL/AC复合纳米纤维抑菌性能的测定

参照Shojaee-Aliabadi^[15]和Yang Yufan^[16]的方法并稍作修改,采用抑菌圈法研究纳米纤维膜对常见食源性微生物(金黄色葡萄球菌和大肠杆菌)的抑菌性能。具体操作步骤如下:菌种(金黄色葡萄球菌和大肠杆菌)活化,传代2~3次,接种后37 °C培养18 h,然后对菌悬液梯度进行稀释,平板培养计数,制成浓度为1×10⁷~1×10⁸ CFU/mL的菌悬液。其次,用打孔器将制得的抗菌膜打出大小均匀一致的直径为1 cm的圆片,称量每个圆片的质量,并放在紫外灯下灭菌2 h;最后,分别将0.1 mL上述两种菌悬液加入到制备的无菌营养肉汤平板中,涂布均匀,得到含菌平板;将上述已灭菌的抗菌膜贴于含菌平板上,37 °C倒置培养24 h,观察抑菌圈并记录其大小。

参照Aytac^[17]和Yang Yufan^[16]的方法并稍作修改,通过活细胞计数法评估纳米纤维膜抑菌活性。首先将0.1 mL的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌菌种接种于100 mL无菌营养肉汤中,活化2~3代,使细菌浓度达到10¹¹ CFU/mL。然后,取活化后的菌液1 mL添加到无菌营养肉汤(0.8%)中,并进行十进制稀释至浓度为

10³~10⁶ CFU/mL。将纳米纤维膜样品(直径为10 mm,紫外灯灭菌2 h)分别放入金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的稀释营养液中,37 °C振荡培养12 h。最后取培养后的菌液0.1 mL涂布于营养琼脂平板,37 °C倒置培养24 h,记录菌落总数,生长抑制率按式(3)计算:

$$\text{生长抑制率/\%} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3)$$

式中: A 为未经纳米纤维膜处理的菌落总数/(CFU/mL); B 为纳米纤维膜处理组的菌落总数/(CFU/mL)。

1.4 数据统计分析

所有实验重复3次。数据使用Statistix 8.1 (Analysis Software, St Paul, MN, USA)进行分析,并以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用Duncan检验进行单因素方差分析,判断均数之间的显著差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同AC添加量PPI/PUL/AC复合纳米纤维红外光谱分析

如图2所示,首先,PPI/PUL/AC复合纳米纤维中显示了PUL特征峰,3 342 cm⁻¹对应于O—H的拉伸振动,该吸收谱带受分子间或分子内氢键影响较大^[8];2 926 cm⁻¹对应C—H键的伸缩振动。其次,1 533 cm⁻¹和1 350 cm⁻¹分别是蛋白酰胺II带和酰胺III带的特征峰^[8],且这些特征峰在所有复合膜中均存在,表明复合膜中蛋白和多糖之间存在相互作用,并较好地复合在一起。此外,纯AC的FTIR光谱在920、1 017、1 423、1 633、3 080 cm⁻¹处显示出特征峰,分别对应于官能团是C—H弯曲、C—O伸缩振动、C—N伸缩振动、C=O伸缩振动、O—H伸缩振动^[18]。与此同时,在PPI/PUL/AC共混体系中,同样观察到了920、1 017、1 423、1 633 cm⁻¹的AC特征峰,表明AC与PPI/PUL共混溶液之间存在分子间或者分子内的相互作用,证实这3种物质在纳米纤维中同时存在。

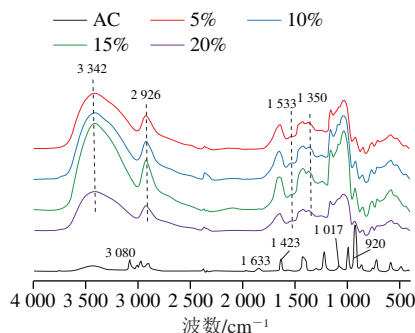
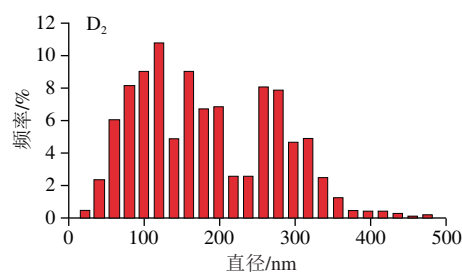
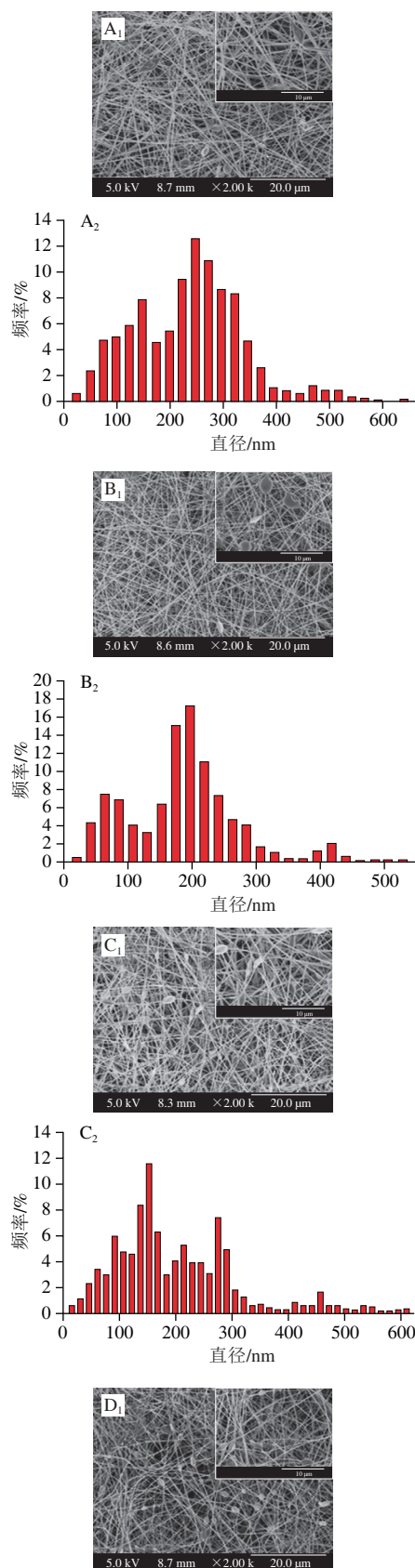


图2 不同AC添加量PPI/PUL/AC纳米纤维膜的红外光谱图
Fig. 2 FTIR spectra of alicin and PPI/PUL/AC nanofibers with different contents of alicin

2.2 不同AC添加量PPI/PUL/AC复合纳米纤维形貌及直径分布



A~D分别代表AC添加量为5%、10%、15%和20%的纳米纤维膜。下标1.扫描电子显微镜；2.直径分布图。

图3 不同AC添加量PPI/PUL/AC纳米纤维膜的扫描电子显微镜(放大倍数为2 000和5 000)及直径分布图

Fig. 3 Scanning electron micrographs of PPI/PUL/AC nanofiber films (at $\times 2\,000$ and $\times 5\,000$ magnification) and diameter distribution

表1 不同AC添加量纳米纤维尺寸

Table 1 Size of PPI/PUL/AC nanofiber films with different contents of allicin

AC添加量/%	纤维平均直径/nm	球状结构尺寸/nm
5	238 \pm 99 ^a	340 \pm 82 ^b
10	191 \pm 62 ^a	350 \pm 120 ^b
15	169 \pm 91 ^a	370 \pm 90 ^b
20	165 \pm 110 ^a	660 \pm 113 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

研究表明, 小分子物质的加入会对纤维形貌产生一定的影响^[19]。图3和表1为复合纳米纤维膜的微观形貌及其直径分布情况。由图3可以看出, 纳米纤维呈随机定向分布, 随着溶液中AC添加量增大, 纳米纤维的直径呈现逐渐减小的趋势 ($P < 0.05$), 而“球形”结构逐渐增多且尺寸也逐渐增大 ($P < 0.05$)。这是由于静电纺丝过程中溶剂的迅速蒸发, 导致纤维中形成“球形”结构, 这也证实了AC成功被包裹在PPI/PUL纳米纤维中, 形成核-壳结构。研究表明, 小分子生物活性物质的浓度对纤维中“球形”状结构的密度和尺寸起重要作用。Vega-Lugo等^[20]的研究表明随着异硫氰酸烯丙酯添加量从5%增加到20%, 纳米纤维直径变得更小, “球形”状结构密度越大。刘雨雨^[21]通过分析负载氧化锌的明胶复合纳米纤维膜的形貌, 发现不添加氧化锌的纤维膜表面光滑, 纤维平均粒径为500 nm, 当氧化锌添加量为2.0%时会发现聚集现象。李珍光^[22]在制备含有天然抗菌剂丁香酚的多组分电纺纳米纤维膜研究中也得到类似的结果。

2.3 不同AC添加量PPI/PUL/AC复合纳米纤维力学性能分析

从表2可以看出, 纳米纤维膜的弹性模量和拉伸强度随AC添加量增加呈先升高后下降的趋势, 且当AC添加量为15%时达到最大值, 其弹性模量和拉伸强度比未添加AC的纳米纤维膜分别提高了68.35 MPa和1.98 MPa, 这表明AC的加入可适当提高纳米纤维膜的力学性能。相关研究表明, 对于复合体系而言, 小分子生物活性物质的分散性及其与聚合物基质之间的相互作用强弱程度对复

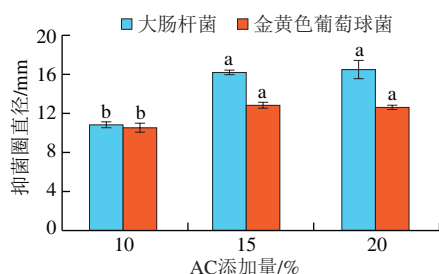
合体系的力学性能具有显著影响^[23-24]。复合体系内分子分散度越好,体系中相互作用效果越好力学性能越强。当AC添加量为20%时,纳米纤维膜的力学性能有所降低,这主要是因为AC含量太高,易发生聚集行为,降低了复合纤维体系的分散性,使得力学性能下降。

表2 不同AC添加量纳米纤维膜机械性能
Table 2 Mechanical properties of PPI/PUL/AC nanofiber films with different contents of allixin

AC添加量/%	弹性模量/MPa	断裂伸长率/%	拉伸强度/MPa
0	27.32±1.16 ^d	8.42±2.38 ^a	0.76±0.08 ^c
5	75.85±1.27 ^{bc}	2.25±0.16 ^b	1.77±0.13 ^b
10	82.05±4.37 ^b	1.69±0.12 ^{bc}	2.36±0.28 ^a
15	95.67±4.93 ^a	1.36±0.03 ^c	2.74±0.23 ^a
20	65.49±5.43 ^c	0.99±0.02 ^c	2.57±0.19 ^a

2.4 不同AC添加量PPI/PUL/AC复合纳米纤维抑菌性能分析

图4表明,当AC添加量为5%时,对于大肠杆菌和金黄色葡萄球菌而言,纳米纤维膜均未出现抑菌圈。AC添加量为15%的纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌表现出最大抑菌圈(12.8 mm),AC添加量为20%的纳米纤维膜对大肠杆菌表现出最大抑菌圈(16.5 mm),与15% AC添加量相比,仅增加0.3 mm。



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图4 不同AC添加量PPI/PUL/AC纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈

Fig. 4 Antibacterial efficacy of PPI/PUL/AC nanofiber films against *E. coli* and *S. aureus*

采用活细胞计数法检测PPI/PUL/AC纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌活性。从图5可以看出,随着纳米纤维膜中AC添加量的增多,细菌菌落的数量减少,复合纳米纤维膜对细菌的抑制率明显提高 ($P < 0.05$)。当纳米纤维膜中AC添加量为15%时,抑制率最大(大肠杆菌抑制率91%,金黄色葡萄球菌抑制率86%),此时菌落数最少。这表明AC添加量大于15%的PPI/PUL/AC纳米纤维膜具有抑菌作用,而AC添加量较低的纳米纤维膜则对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率较低甚至没有抑菌作用。该研究结果表明PPI/PUL/AC复合纳米纤维膜具有抑菌活性。Wang Yufeng等^[13]研究AC

微胶囊对日常食品(豆腐、面包、鸡肉和猪肉)的保鲜作用,结果显示AC微胶囊抗菌效果显著。李珍光^[22]研究含有天然抗菌剂丁香酚的多组分电纺纳米纤维膜的抑菌活性,研究表明随着电纺纳米纤维膜样品中丁香酚含量的增加,抑菌率逐渐升高,丁香酚添加量为30%时,复合电纺纳米纤维膜具有最高的抑菌率,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别为71.6%和78.6%。此外,许多研究报道了利用静电纺丝技术包覆其他活性化合物,如肉桂醛^[16]、姜黄素^[19,25-26]、茶多酚^[27-28]、丁羟基茴香醚^[29]、花青素^[30]、丁香酚^[31]和花椒精油^[32]等,同样实现抑菌的功效。综上所述,利用静电纺丝制备的复合纳米纤维膜具有抑菌活性,可用于食品包装领域。

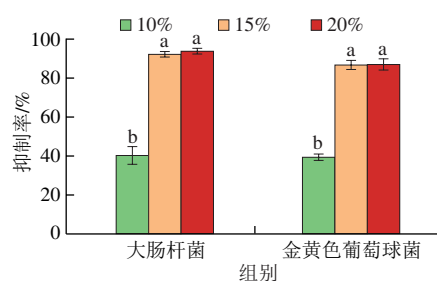


图5 不同AC添加量PPI/PUL/AC纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率

Fig. 5 Inhibitory effect of PPI/PUL/AC nanofiber films with different contents of allixin on the growth of *E. coli* and *S. aureus*

3 结论

利用静电纺丝技术成功制备了PPI/PUL/AC抗菌纳米纤维膜。FTIR证实纳米纤维中存在AC,通过分析纳米纤维膜的性质可知,随着AC的加入,纳米纤维会出现一些“球形”结构,“球形”数量随着AC添加量的增大而增多。同时,AC的复合可显著提高纳米纤维膜的力学性能,当AC添加量为15%时,纳米纤维膜的力学性能最佳。抑菌性能测试结果表明,包覆AC的纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有抑制作用,特别是当AC添加量达到15%及以上时,纳米纤维膜的抑菌作用显著。利用静电纺丝制备的抗菌纳米纤维在食品包装领域具有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈美梅,郭荣辉. 抗菌材料的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2019, 36(1): 153-157. DOI:10.3969/j.issn.1671-9905.2011.09.007.
- [2] 罗佳露. 常见无机抗菌材料的研究进展[J]. 广州化工, 2017, 45(16): 1-2. DOI:CNKI:SUN:GZHA.0.2017-16-002.
- [3] 宋雪健,张东杰,王洪江,等. 天然生物抗菌剂纳他霉素在食品中的应用及研究进展[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(5): 129-135. DOI:CNKI: SUN:BXJG.0.2017-05-022.

- [4] YANG H, WEN P, FENG K, et al. Encapsulation of fish oil in a coaxial electrospun nanofibrous mat and its properties[J]. RSC Advances, 2017, 7(24): 14939-14946. DOI:10.1039/c7ra00051k.
- [5] YANG J M, ZHA L S, YU D G, et al. Coaxial electrospinning with acetic acid for preparing ferulic acid/zein composite fibers with improved drug release profiles[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 102(2): 737-743. DOI:10.1016/j.colsurfb.2012.09.039.
- [6] 贾惜文, 王浩, 赵神彳, 等. 以多糖和蛋白质为基质利用静电纺丝技术构建生物活性物质递送体系的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 313-321. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.07.054.
- [7] 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, 2017, 77: 726-735. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.11.014.
- [8] JIA X W, QIN Z Y, XU J X, et al. Preparation and characterization of pea protein isolate-pullulan blend electrospun nanofiber films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 641-647. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.11.216.
- [9] PÉREZ-GIRALDO C, CRUZ-VILLALÓN G, SÁNCHEZ-SILOS R, et al. *In vitro* activity of allicin against staphylococcus epidermidis and influence of subinhibitory concentrations on biofilm formation[J]. Journal of Applied Microbiology, 2003, 95(4): 709-711. DOI:10.1046/j.1365-2672.2003.02030.x.
- [10] ATSAMNIA D, HAMADACHE M, HANINI S, et al. Prediction of the antibacterial activity of garlic extract on *E. coli*, *S. aureus* and *B. subtilis* by determining the diameter of the inhibition zones using artificial neural networks[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 287-295. DOI:10.1016/j.lwt.2017.04.053.
- [11] SALEHI B, ZUCCA P, ORHAN I E, et al. Allicin and health: a comprehensive review[J]. Trends Food Science and Technology, 2019, 86: 502-516. DOI:10.1016/j.tifs.2019.03.003.
- [12] ACEITUNO-MEDINA M, MENDOZA S, LAGARON J M, et al. Development and characterization of food-grade electrospun fibers from amaranth protein and pullulan blends[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 667-674. DOI:10.1016/j.foodres.2013.07.055.
- [13] WANG Y F, JIA J, SHAO J J, et al. Preservative effects of allicin microcapsules on daily foods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 225-230. DOI:10.1016/j.lwt.2018.08.043.
- [14] 王博, 巩涵, 畅鹏, 等. 细菌纤维素-茶多酚复合膜的特性及结构[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 229-235. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201817037.
- [15] SHOJAEE-ALIABADI S, HOSSEINI H, MOHAMMADIFAR M A, et al. Characterization of κ -carrageenan films incorporated plant essential oils with improved antimicrobial activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101: 582-591. DOI:10.1016/j.carbpol.2013.09.070.
- [16] YANG Y F, ZHENG S L, LIU Q, et al. Fabrication and characterization of cinnamaldehyde loaded polysaccharide composite nanofiber film as potential antimicrobial packaging material[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100600. DOI:10.1016/j.foodpsl.2020.100600.
- [17] AYTAC Z, IPEK S, DURGUN E, et al. Antibacterial electrospun zein nanofibrous web encapsulating thymol/cyclodextrin-inclusion complex for food packaging[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 117-124. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.095.
- [18] LU Q, LU P M, PIAO J H, et al. Preparation and physicochemical characteristics of an allicin nanoliposome and its release behavior[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57: 686-695. DOI:10.1016/j.lwt.2014.01.044.
- [19] BLANCO-PADILLA A, LÓPEZ-RUBIO A, LOARCA-PIÑA G, et al. Characterization, release and antioxidant activity of curcumin-loaded amaranth-pullulan electrospun fibers[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1137-1144. DOI:10.1016/j.lwt.2015.03.081.
- [20] VEGA-LUGO A C, LIM L T. Controlled release of allyl isothiocyanate using soy protein and poly(lactic acid) electrospun fibers[J]. Food Research International, 2009, 42(8): 933-940. DOI:10.1016/j.foodres.2009.05.005.
- [21] 刘雨雨. ZnO-乙基纤维素/明胶复合纳米纤维膜的制备及性质探究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [22] 李珍光. 含天然抗菌剂丁香酚的多组分电纺纤维膜的制备与性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [23] 杨宇帆. 静电纺丝技术制备肉桂醛活性纳米纤维膜及在冷却肉保鲜中的应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [24] 朱政泽, 邱肖华, 吴依莎, 等. 可食性大蒜素/淀粉抑菌膜的制备及性能研究[J]. 现代食品, 2019(4): 48-54.
- [25] TSEKOVA P B, SPASOVA M G, MANOLOVA N E, et al. Electrospun curcumin-loaded cellulose acetate/polyvinylpyrrolidone fibrous materials with complex architecture and antibacterial activity[J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 73: 206-214. DOI:10.1016/j.msec.2016.12.086.
- [26] ALEHOSSEINI A, GÓMEZ-MASCARAQUE L G, MARTÍNEZ-SANZ M, et al. Electrospun curcumin-loaded protein nanofiber mats as active/bioactive coatings for food packaging applications[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 758-771. DOI:10.1016/J.FOODHYD.2018.08.056.
- [27] SHAO P, NIU B, CHEN H, et al. Fabrication and characterization of tea polyphenols loaded pullulan-CMC electrospun nanofiber for fruit preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 107: 1908-1914. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.10.054.
- [28] YANG Y, SHI Y, CAO X, 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.
- [29] LI L L, WANG H L, CHEN M M, et al. Butylated hydroxyanisole encapsulated in gelatin fiber mats: volatile release kinetics, functional effectiveness and application to strawberry preservation[J]. Food Chemistry, 2018, 269: 142-149. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.06.150.
- [30] WANG S, MARCONE M F, BARBUT S, et al. Electrospun soy protein isolate-based fiber fortified with anthocyanin-rich red raspberry (*Rubus strigosus*) extracts[J]. Food Research International, 2013, 52(2): 467-472. DOI:10.1016/j.foodres.2012.12.036.
- [31] 于栋, 冯晓阳, 曹传爱, 等. 丁香酚对静电纺丝抑菌吸水衬垫结构和功能性质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 109-115. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211205-060.
- [32] QIN Z Y, ZOU Y C, ZHANG Y P, et al. Electrospun pullulan nanofiber loading zanthoxylum bungeanum essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complexes for active packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 210: 465-474. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2022.04.155.