DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.002

五味子红色素纳米纤维膜的制备及其抗菌性能

郭文娟[1],任 和[2],张 颖[2],付俊杰[1],代 昭[2]
(1. 天津工业大学 药学院,天津 300387;2. 天津工业大学 化学工程与技术学院,天津 300387)

摘 要: 为开发无毒副作用且不易产生耐药性的新型伤口敷料,将天然抗菌成分五味子红色素应用于抗菌敷料。通过静电纺丝技术,采用混合电纺聚丙烯腈(PAN)和五味子红色素提取物制备五味子纳米抗菌纤维膜;通过 SEM 观察纤维膜表面形貌,探究最佳静电纺丝工艺,并考察五味子红色素纳米抑菌纤维膜对于大肠杆菌、白念珠菌、金黄色葡萄球菌的抑制效果。结果表明:最佳静电纺丝工艺为纺丝液中 PAN 质量分数 14%、纺丝电压 12 kV、纺丝推注速率 0.4 mL/h、五味子红色素含量 200 mg,此条件下制得的五味子纳米纤维平均直径为(243.86 ± 0.95) nm;五味子红色素纳米纤维膜对大肠杆菌、白色念珠菌和金色葡萄球菌均具有不同程度的抑制效果,其中对白念珠菌抑制效果最显著,抑制率达 33.87%;五味子抗菌纤维膜实现了五味子红色素的均匀负载,在蒸馏水中浸泡 8 h 时红色素与纤维膜结合稳定,无释放损失。

关键词: 五味子;静电纺丝;纳米纤维膜;抗菌性能
中图分类号: TQ464.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2025)05-0008-08

Preparation of *Schisandra chinensis* red pigment nanofiber membrane and its antimicrobial properties

GUO Wenjuan[1], REN He[2], ZHANG Ying[2], FU Junjie[1], DAI Zhao[2]
(1. School of Pharmaceutical Sciences, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China))

Abstract: To develop new wound dressings that are non-toxic and not conducive to the development of drug resistance, the natural antimicrobial component *Schisandra chinensis* red pigment was applied to the study of antimicrobial dressings. By electrostatic spinning technology, the hybrid electrospun polyacrylonitrile (PAN) and *Schisandra chinensis* red pigment extract were used to prepare *Schisandra chinensis* antibacterial fiber membrane. The membrane's surface morphology was observed by scanning electron microscopy (SEM). The study also explored the optimal electrostatic spinning process and investigated the inhibitory effect of the *Schisandra chinensis* red pigment antibacterial fiber membrane on *Escherichia coli*, *Candida albicans*, and *Staphylococcus aureus*. The results demonstrate that the optimal electrostatic spinning process is characterized by a PAN mass fraction of 14% in the spinning solution, a spinning voltage of 12 kV, a spinning injection rate of 0.4 mL/h, and a content of 200 mg of *Schisandra chinensis* red pigment. The average diameter of the *Schisandra chinensis* nanofibers produced under these conditions is (243.86 ± 0.95) nm. The *Schisandra chinensis* red pigment nanofiber membranes have different degrees of inhibitory effects on *Escherichia coli*, *Candida albicans*, and *Staphylococcus aureus*. The degree of inhibition varies, with the most significant effect observed against *Candida albicans*, exhibiting an inhibition rate of 33.87%. The antimicrobial fiber membrane of *Schisandra chinensis* achieved a uniform loading of *Schisandra chinensis* red pigment, and the red pigment was stably bound to the fiber membrane with no loss of release during 8 h of immersion in distilled water.

Key words: *Schisandra chinensis*; electrostatic spinning; nanofiber membrane; antibacterial properties

收稿日期: 2024-03-04
基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性项目(2018034);山东省自然科学基金项目(ZR2022ME095);天津工业大学纤维研究基金项目(TGF-21-B5);天津工业大学医工结合科研计划课题(2021YGJHLX03)
通信作者: 郭文娟(1980—),女,博士,副教授,主要研究方向为天然产物化学。E-mail: guowenjuan@tiangong.edu.cn

细菌感染常常是妨碍伤口愈合的罪魁祸首之一。因此，为了有效地预防伤口感染、保障组织正常康复，研发出能够携带抗菌药物或抗菌活性成分并能在创面局部释放的敷料，成为当今医疗领域的研发重点。目前最为常见的抗菌剂主要有具有广谱抗菌性的氧化铁、纳米银和氧化锌等，但这些金属及金属氧化物可能会存在细胞生物毒性，还可能会出现纳米颗粒聚集脱落等问题[1]，对伤口愈合起到反作用。除此之外，抗生素类药物，如环丙沙星[2]、米诺环素[3]等也被广泛使用，但在构建载药体系时的具体负载量需要谨慎处理，过度使用抗生素可能强化细菌对药物的抵抗力，甚至增加超级细菌出现的概率。因此，有必要研究一种成分安全、抗菌剂负载均匀、无毒副作用、不易产生耐药性的新型抗菌材料。

我国古代就有应用天然中草药经过炮制后运用于外伤修复的记载，已经有相当多的临床案例展示了天然药物的出色功效。近代研究表明，天然植物中黄酮类物质拥有多种生物活性，包括抗病毒、抗菌、抗肿瘤和抗氧化自由基等[4-7]。黄酮由于其显著的细菌抑制活性，在抗菌治疗的应用中有望替代抗生素。五味子为木兰科植物五味子（*Schisandra chinensis*）或华中五味子（*Schisandra sphenanthera*）的干燥成熟果实，富含黄酮类花色苷化合物[8]，在抗肿瘤、抗菌方面显示出优秀的潜力。例如 Song 等[9]的研究表明五味子提取物可以破坏金黄色葡萄球菌的细胞膜和细胞壁；Kim 等[10]发现五味子具有抗氧化性、抗衰老、增强免疫和预防肿瘤等保健功能；Jung 等[11]发现五味子果实中的 Gomisin J 具有抗癌活性；Guo 等[12]研究了五味子果实提取物对于由痤疮丙酸杆菌刺激的 THP-1 细胞和经 UVB 照射的 HDF 细胞的炎症状态，并表现出显著改善作用，体现出治疗痤疮和预防光老化的潜力。

如果将五味子的天然抗菌性添加在电纺纳米纤维中，不仅成分天然安全，还能有助于减少目前抗菌剂对抗生素的需求，减缓抗生素耐药性的发展。静电纺丝技术（electrospinning technology）获得的纳米纤维具有良好的机械性能、透气性和生物相容性，拥有高比表面积、可功能化、孔隙率可调等优点。通过联合电纺聚合物与药物分子，包括蛋白、抗体、生长因子等生物小分子和大分子化合物，可以制备具有药物载体功能的纳米纤维[13]。这些载药纤维的直径较小，表面积较大，从而更有利于增强药物的溶出和分散效果。相比其他纳米结构，电纺纳米纤维具有与细胞外基质形态结构相似的独特优势，有助于促进细胞的附着、增殖和迁移。鉴于静电纺纳米纤维的特点，包括出色透气性、多孔结构、对伤口渗出液的高吸收性以及呈现出纳米毡的形态等，抗菌纳米纤维被认为是一种新型的伤口愈合管理材料[14]，具有极大的研究潜力。作为电纺纤维的基质，人工合成高分子聚合物常常具有卓越的机械强度和稳定性。聚乳酸、聚乙二醇、聚己内酯、聚乙交酯-丙交酯和聚乙烯醇等[15-18]在合成和改性方面表现出极大的灵活性。然而，由于合成聚合物对细胞的亲和力较低，其表面缺乏细胞识别位点，从而降低了细胞的黏附和增殖能力。为解决这一问题，近年来研究者们选择将天然植物提取物与合成聚合物进行共混电纺，制备出具有复合基质特性的材料，以充分发挥二者的优势[19]。

目前国内外对五味子红色素的开发利用研究报道较少，五味子抗菌纤维膜领域的研究较为空白。基于此，本研究利用静电纺丝技术，混合电纺聚丙烯腈（PAN）和五味子红色素，实现五味子红色素的均匀负载，通过对电压、推注速率、纺丝液质量浓度、五味子红色素含量等工艺参数的严格控制，获得具有可调结构和功能性的纳米纤维膜，并测试纳米纤维膜的抗菌性能，以期为五味子红色素在伤口敷料等医疗方面的应用提供支持。

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

试剂：五味子，通化市同福参茸制品有限公司；聚丙烯腈（PAN），合肥思品科技有限责任公司；牛肉浸膏，天津市英博生化试剂有限公司；琼脂粉，天津市致远化学试剂有限公司；蛋白胨，北京奥博星生物技术有限责任公司；氢氧化钠、氯化钠、无水乙醇、N，N 二甲基甲酰胺（DMF），均为国产分析纯，市售；金黄色葡萄球菌、白念珠菌、大肠杆菌，均为实验室培育。

仪器：静电纺丝机，自制；Hitachi S4800 型冷场发射扫描电镜、SwiftED3000 型真空离子溅射机，日本 Hitachi 公司；TU-1091 型紫外可见分光光度计，北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2　五味子红色素的提取

称取 3 g 的五味子粉末，用体积分数为 60%的乙醇溶液，按 1∶20 的比例在室温下超声浸提 30 min，抽滤，静置一段时间后取上层清液 1 mL，将提取液稀释 5 倍后，扫描其紫外-可见光谱，结果如图 1 所示，可见其最大吸收波长为 514 nm。Ma 等[8]对五味子中的色素成分进行了分离鉴定，并确定了最主要色素成分为 Cyanidin-3-O-xylosyl-rutinoside，是矢车菊素 3 位的三糖取代糖苷，其分子结构如图 2 所示，Cyanidin-3-O-xylosyl-rutinoside 分子结构中包含具有共轭双键的

芳香环,共轭双键之间的 π–π* 跃迁使紫外最大吸收波长在 500~520 nm 之间,与实际结果相符,因此,以提取液 514 nm 的吸光度值作为五味子红色素的判定依据。

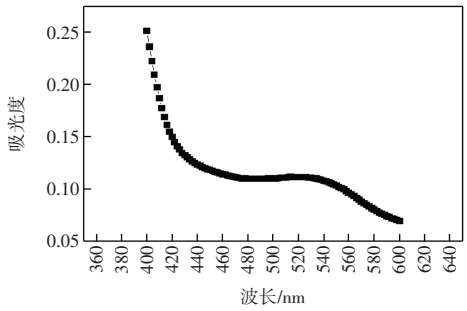


图 1　五味子红色素提取液的紫外–可见吸收光谱

Fig.1　UV–Vis absorption spectra of *Schisandra chinensi*–red pigment extracts

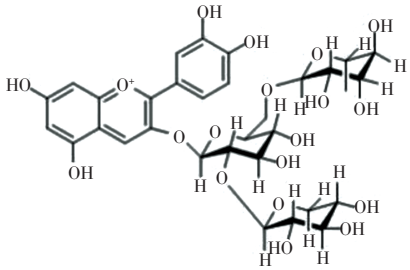


图 2　Cyanidin–3–O–xylosyl–rutinoside 分子结构

Fig.2　Molecular structure of cyanidin–3–O–xylosyl–rutinoside

1.3　静电纺丝纳米纤维材料的制备

五味子抗菌纳米纤维膜的制备过程如图 3 所示。取一定量的聚丙烯腈(PAN)溶解于 DMF 中,加入一定量的五味子红色素提取物,在 50 ℃条件下搅拌 5 h,配制成不同质量浓度的纺丝溶液进行静电纺丝,接收间距为 18 cm、纺丝针头为 22 G,滚筒转速为 100 r/min,温度控制在(30 ± 3) ℃,湿度为(30 ± 4)%,纺丝时间为 2 h。通过扫描电镜观察纤维形态,确定优化的工艺参数,制得五味子红色素复合纳米纤维膜。

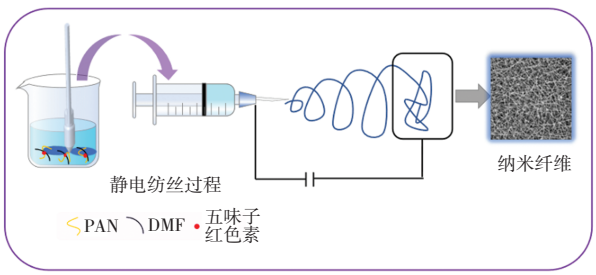


图 3　五味子抗菌纳米纤维膜制备示意

Fig.3　Schematic diagram of preparation of antimicrobial nanofiber membrane of *Schisandra chinensis*

1.4　五味子纳米纤维表面形貌表征

从试样膜中剪取小块并贴附到样品台上，使用 SwiftED3000 型真空离子溅射机进行金属镀覆。随后通过扫描电镜观察纳米纤维膜的微观形貌。使用 Nano Measurer1.2 软件随机选取 100 根纤维测量其直径并进行统计分析。

1.5　抑菌性能测定

1.5.1　五味子红色素的抗菌性能

分别称量 0.625、1.250、2.500、5.000、10.000 mg 五味子红色素粗提物各 3 份,分别溶于 1 mL 蒸馏水中,每份粗提物溶液中加入 4 个直径 6 mm 的小滤片浸泡 2 h,将 3 个小滤片均匀点在含金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、白念珠菌的平板培养基表面,使药片与琼脂培养基紧密贴合,并点入一片空白对照滤片,于 37 ℃培养 24 h,观察抑菌圈并记录其大小。药片周围出现 8 mm 以上的抑菌圈说明此浓度具有抑菌效果[20]。

1.5.2　五味子红色素纳米纤维膜的抑菌性能

将大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白念珠菌分别在琼脂培养基上接种，放置于 37 ℃恒温培养箱中培养 12 h。挑选单个菌落,分别接种于 10 mL 液体培养基中,并于 37 ℃、150 r/min 的摇床中培养至菌液的 OD600 值(菌液在 600 nm 波长处的吸光值,其正比于菌液的浓度,相应地与样品的透过率 T 值成反比,在数值上它们之间是对数关系) 达到约 0.3。取 6 支 10 mL 试管,每支加入 4.9 mL 液体培养基,按照体积 1∶50(菌液∶液体培养基)的比例将 3 株菌分别接入试管,并将其置于 20 cm × 10 cm 的五味子纳米纤维膜上,同时设置空白对照组。将试管放入 37 ℃、150 r/min 的摇床中进行培养。在培养的 0~72 h 中每隔 4 h 各取出 5 mL 菌液进行 OD600 值的测定，每个时间点重复测定 2 次。以 3 株菌菌液培养时间为横坐标,以所测菌液的平均 OD600 值为纵坐标，绘制出 3 株菌的生长曲线，考察五味子红色素纳米纤维膜的抑菌性能。

1.5.3　纤维膜中五味子红色素的释放情况

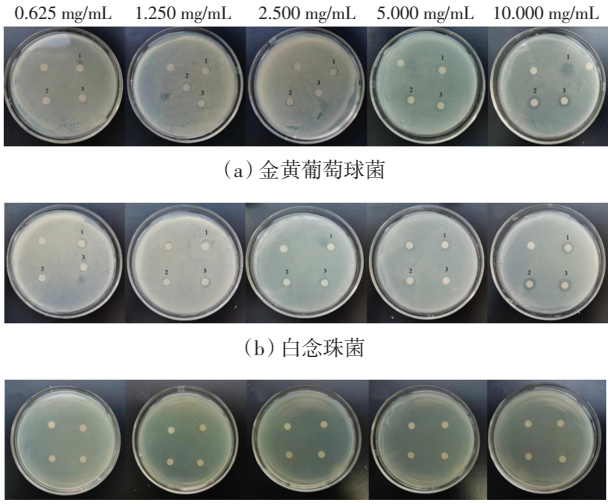
为考察五味子红色素在纤维膜中的稳定性,将制得的纳米纤维膜剪成 20 mm × 10 mm 的长方形纤维膜,将纤维膜放入 5 mL 蒸馏水中进行振荡,每隔 1 h 测试溶液在 514 nm 处的吸光度值，以确定纤维膜中的五味子红色素的释放情况。

2　结果与讨论

2.1　五味子红色素的抑菌作用

0.625、1.250、2.500、5.000、10.000 mg/mL 五味子红色素提取物对金黄色葡萄球菌、白念珠菌、大肠杆菌的抑菌效果如图 4 所示。在大肠杆菌实验中发现,五味子红色素质量浓度小于 10.000 mg/mL 时药片周围几乎

看不到抑菌圈,因此本文继续实验五味子红色素质量浓度为50.000、100.000、200.000、400.000 mg/mL 时对大肠杆菌的抑菌效果,如图 5 所示。不同浓度下五味子红色素对金黄色葡萄球菌、白念珠菌、大肠杆菌的抑菌圈直径如表 1—表 3 所示。



(a) 金黄葡萄球菌

(b) 白念珠菌

(c) 大肠杆菌

图 4　低浓度五味子红色素的抑菌效果

Fig.4　Inhibitory effect of *Schisandra chinensis* red pigment with low concentration

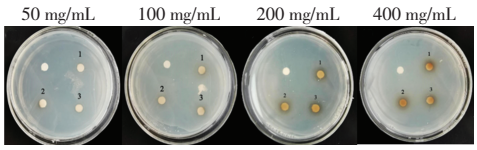


图 5　高浓度五味子红色素对大肠杆菌的抑菌效果

Fig.5　Inhibitory effect of *Schisandra chinensis* red pigment with high concentration on *Escherichia coli*

表 1　五味子红色素对金葡萄球菌的抑菌圈直径

Tab.1　Circle diameter of inhibition of *Staphylococcus aureus* by *Schisandra chinensis* red pigments

质量浓度/(mg·mL^{-1})	抑菌圈直径/mm			
	药片 1	药片 2	药片 3	平均值
0.625	6.6	6.1	6.7	6.5
1.250	7.6	8.9	6.9	7.8
2.500	7.2	7.2	7.9	7.4
5.000	10.3	7.3	8.2	8.6
10.000	9.2	9.6	9.2	9.3

表 2　五味子红色素对白念珠菌的抑菌圈直径

Tab.2　Circle diameter of inhibition of *Candida albicans* by *Schisandra chinensis* red pigments

质量浓度/(mg·mL^{-1})	抑菌圈直径/mm			
	药片 1	药片 2	药片 3	平均值
0.625	7.3	6.5	7.9	7.2
1.250	9.0	7.2	9.2	8.5
2.500	9.3	7.0	9.6	8.6
5.000	7.6	10.1	8.9	8.9
10.000	8.8	10.1	10.1	9.7

表 3　五味子红色素对大肠杆菌的抑菌圈直径

Tab.3　Circle diameter of inhibition of *Schisandra chinensis* red pigment against *Escherichia coli*

质量浓度/(mg·mL^{-1})	抑菌圈直径/mm			
	药片 1	药片 2	药片 3	平均值
50.000	6.5	6.0	7.3	6.6
100.000	7.0	6.5	6.5	6.7
200.000	7.2	7. 8	7.3	7.4
400.000	8.1	8.4	7.9	8.1

由表 1—表3 可知，五味子红色素质量浓度为 5.000 mg/mL 时对金黄色葡萄球菌有抑制作用;质量浓度为 1.250 mg/mL 对白念珠菌有抑制作用；质量浓度为 400.000 mg/mL 对大肠杆菌有抑制作用。这说明五味子红色素对金葡萄球菌、白念珠菌、大肠杆菌均有抑菌性,但对大肠杆菌抑菌效果不明显,五味子红色素提取物的抑菌敏感程度为:白念珠菌>金葡萄球菌>大肠杆菌。

2.2　五味子纳米纤维制备条件的优化

2.2.1　PAN 质量分数

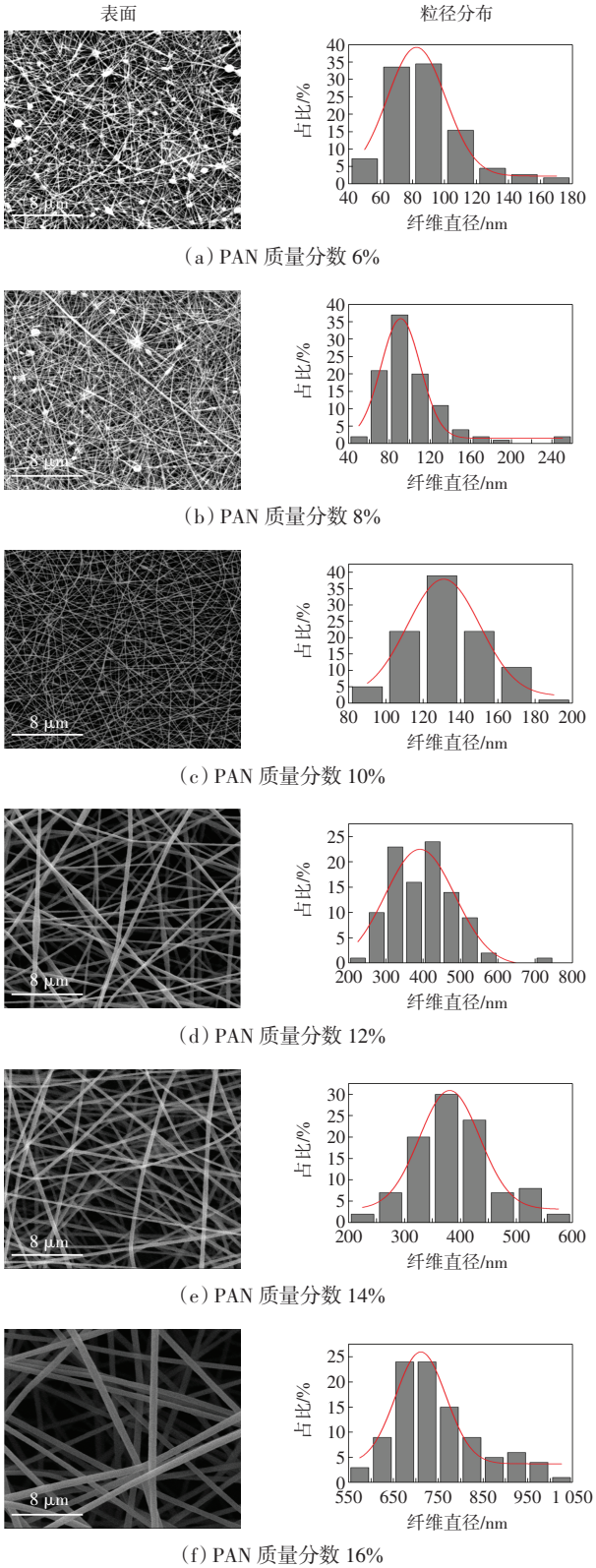
五味子红色素提取物为 100 mg、设置纺丝电压 12 kV、注射泵推注速率为 0.4 mL/h 条件下考察纺丝液中不同 PAN 质量分数对所得纳米纤维形貌及其直径的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可知，随着纺丝液中 PAN 质量分数从 6%升至 16%,纤维直径逐渐增大。PAN 质量分数较低时喷流不稳定,形成纺锤型珠状物附着在纤维上;当纺丝液中 PAN 质量分数为 14%时,所得纤维呈现均匀且一致的直径分布;然而,随着 PAN 质量分数继续升高,纤维直径分布变得更为分散,直径增大,纤维膜致密性降低。由于高浓度的纺丝液容易在喷丝头末端凝固堵塞针头,从而影响纺丝液均匀的喷射。因此,选择最佳 PAN 质量分数为 14%。

2.2.2　纺丝电压

纺丝液中 PAN 质量分数为 14%、五味子红色素提取物为 100 mg、注射泵推注速率为 0.2 mL/h 条件下考察不同纺丝电压对所得纳米纤维形貌及其直径的影响,结果如图 7 所示。

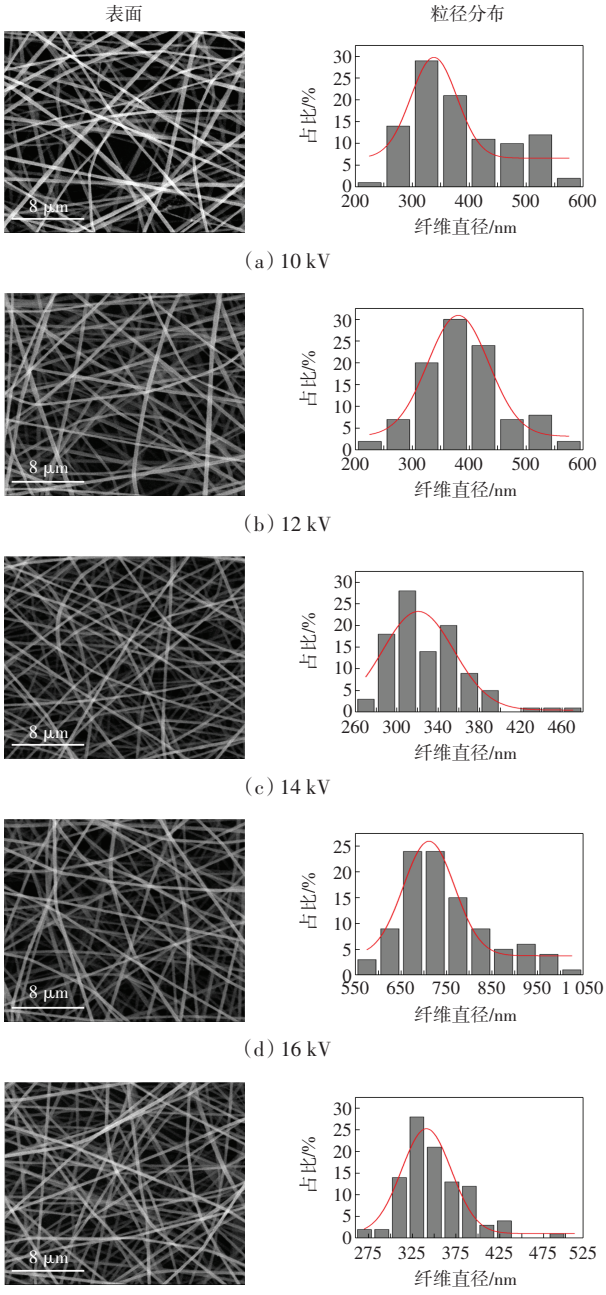
由图 7 可知,随着电压的升高,纤维直径逐渐减小。当电压达到 10 kV 时，纺织产物呈现纺锤形珠状物,显示其未完全伸展;增加电压,特别是在 12 kV 时,不仅纤维直径减小,而且表面上的纺锤形珠状物也减少;然而,当电压升至 16 kV 以上,纤维膜表面再次出现珠状物,这是因为过高的电压增加了射流的不稳定性,导致电场力扯断了一些纤维。因此,选择最佳纺丝电压为 12 kV。



(a) PAN 质量分数 6%　(b) PAN 质量分数 8%　(c) PAN 质量分数 10%　(d) PAN 质量分数 12%　(e) PAN 质量分数 14%　(f) PAN 质量分数 16%

图 6　不同 PAN 质量分数的五味子红色素纳米纤维膜表面形貌和其对应粒径分布

Fig.6　Surface morphology of *Schisandra chinensis* red igment nanofiber membranes with different PAN mass fraction and their corresponding particle size distributions



(a) 10 kV　(b) 12 kV　(c) 14 kV　(d) 16 kV　(e) 18 kV

图 7　不同纺丝电压的五味子红色素纳米纤维膜表面形貌及其粒径分布

Fig.7　Surface morphology of *Schisandra chinensis* red pigment nanofiber membranes at different spinning voltages and their corresponding particle size distributions

2.2.3　纺丝液推注速率

纺丝液中 PAN 质量分数为 14%、五味子红色素提取物为 100 mg、纺丝电压分别为 12 kV 条件下考察不同纺丝液推注速率对所得纳米纤维形貌及其直径的影响，结果如图 8 所示。

由图 8 可知，随着推注速率的增加，纤维直径先增大后减小。在推注速率为 0.2 mL/h 时，纺丝液在针头

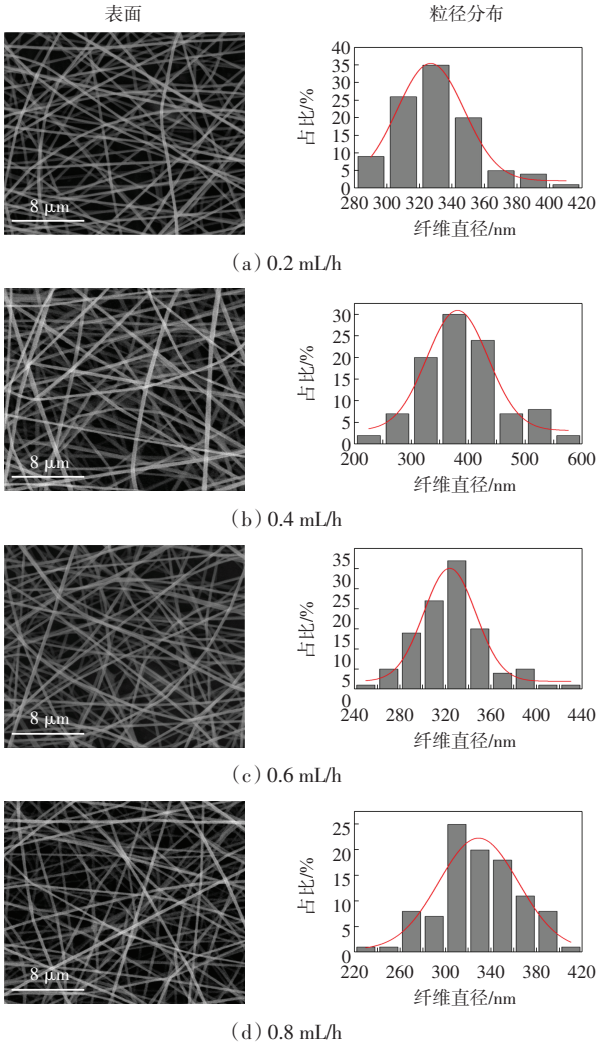


图 8　不同推注速率下五味子红色素纳米纤维膜的表面形貌及其对应粒径分布

Fig.8　Surface morphology of *Schisandra chinensis* red pigment nanofiber membranes with different injection rates and their corresponding particle size distributions

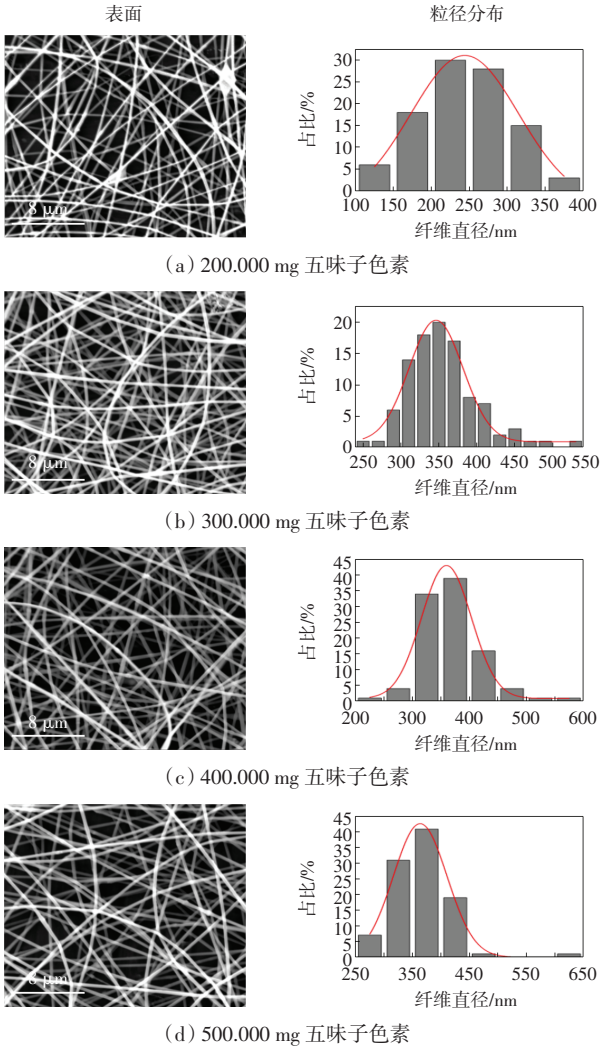


图 9　不同五味子红色素含量的纳米纤维膜表面形貌及对应粒径分布

Fig.9　Surface morphology of nanofiber membranes with different content of *Schisandra chinensis* red pigment and their corresponding particle size distributions

末端凝固发生堵塞。当推注速率增至 0.6 和 0.8 mL/h 时，喷丝头末端排出了过多的液体，电场力无法使这些额外的液滴完全伸展，因此略有珠状物的形成；此外，多余的溶液在到达接收滚筒之前没有足够的时间挥发，可能损害已形成的纤维膜。当推注速率为 0.4 mL/h 时，纤维直径适中，纺丝液没有在喷丝头末端凝固，同时不会有多余的液滴滞留在喷头。因此，选择最佳推注速率为 0.4 mL/h。

2.2.4　五味子红色素含量

PAN 质量分数为 14%、注射泵推注速率为 0.2 mL/h、纺丝电压为 12 kV 条件下考察不同五味子红色素含量对所得纳米纤维形貌及其直径的影响，结果如图 9 所示。

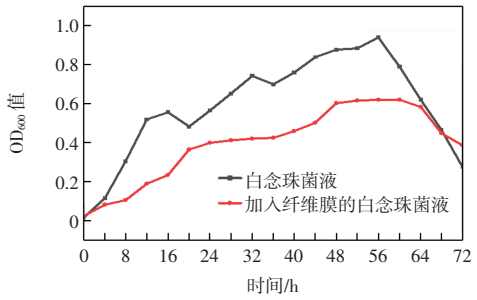
由图 9 可知，本文条件下不同五味子含量纳米纤维的表面形貌基本没有较大区别，说明五味子含量对于纤维形貌的影响较小。从粒径分布及直径大小方面考虑，选择五味子含量为 200.000 mg 作为最佳工艺参数。

综上所述，最佳静电纺丝工艺为：纺丝液中 PAN 质量分数为 14%，纺丝电压为 12 kV，纺丝推注速率为 0.4 mL/h，五味子红色素含量为 200.000 mg。最佳工艺下的五味子纤维平均直径为（243.86 ± 0.95）nm。

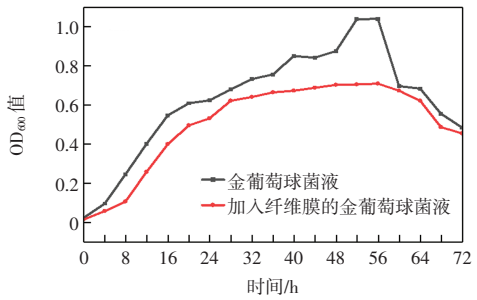
2.3　五味子纳米纤维的抗菌性能

通过绘制五味子红色素纳米纤维对白念珠菌、金黄葡萄球菌、大肠杆菌的生长抑制曲线来比较纳米纤维对不同细菌的抑菌效果，如图 10 所示。

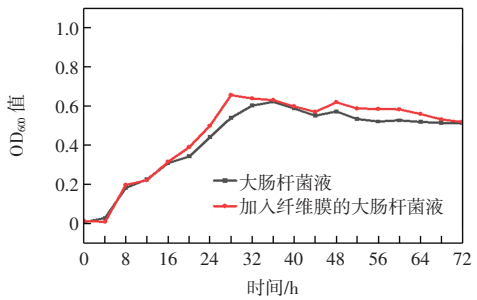
由图 10（a）可知，仅含有白念珠菌的培养液的 OD 值在 0~56 h 不断增大，56 h 之后 OD 值开始下降，这是由于培养后期培养基不断消耗，无法提供充足营养导致细菌死亡；加入了含有五味子红色素的纤维膜后



(a)对白念珠菌的生长抑制曲线



(b)对金黄色葡萄球菌的生长抑制曲线



(c)对大肠杆菌的生长抑制曲线

图 10　五味子红色素纳米纤维对 3 种细菌的生长抑制曲线

Fig.10　Growth inhibition curves of three kinds of bacteria by *Schisandra chinensis* red pigment nano fiber

细菌培养液的菌生长明显被抑制。相较于对照组白念珠菌的 OD 值在 56 h 处于峰值 0.939，加入五味子红色素纤维膜 56 h 后 OD 值仅为 0.621，抑制率达 33.87%。

由图 10(b)可知，仅含有金黄葡萄球菌的培养液在 0~48 h 其 OD 值不断增长，48~56 h 短暂的有一段平台期，56 h 就开始下降；加入了含有五味子红色素的纤维膜后细菌培养液的菌生长明显被抑制，充分证明了纤维膜对于金葡萄球菌具有抑制作用。相较于对照组金黄葡萄球菌的 OD 值在 56 h 处于峰值 1.043，加入五味子红色素纤维膜 56 h 后 OD 值仅为 0.711，抑制率为 31.83%。

由图 10(c)可知，大肠杆菌在 0~32 h 其 OD 值不断增大，32 h 之后开始下降。加入了含有五味子红色素的纤维膜后细菌培养液的菌生长相比于未加入纤维膜的培养液基本一致，说明纤维膜对于大肠杆菌的抑制作用较弱。

综上所述，五味子红色素纳米纤维膜对 3 种菌表现出了不同的抑制作用。其中，白念珠菌生长迅速，纤维膜对其生长的抑制作用也是最为明显的；金黄色葡萄球菌生长速度相对比较缓和，纤维膜对其生长也存在抑制作用，但抑制作用相对较弱；大肠杆菌 32 h 后生长速度有所下降，进入平台期，纤维膜对于大肠杆菌的抑制作用最弱。由此可得，五味子红色素纳米纤维膜对于 3 种菌的抑制作用排序为：白念珠菌>金葡萄球菌>大肠杆菌。

2.4　五味子红色素纳米纤维的稳定性

五味子红色素纳米纤维膜浸泡液在不同时间下的吸光度值如表 4 所示。

表 4　纤维膜浸泡液在不同时间下的吸光度值

Tab.4　Absorbance values of fiber membrane soaking solution at different times

时间/h	溶液吸光度	时间/h	溶液吸光度
0	0	5	0.002
1	0.002	6	0.002
2	0.002	7	0.002
3	0.002	8	0.002
4	0.002		

由表 4 可知，将纤维膜浸泡在蒸馏水中 8 h，514 nm 处的吸光度值基本为 0，并且 8 h 内数值基本一致，纤维膜并未出现溶胀、解离等现象，说明纤维膜中的五味子红色素稳定存在，基本不会释放损失，本研究制备的五味子红色素抗菌纤维膜性状稳定。

3　结　论

通过静电纺丝技术成功制备负载五味子红色素的纳米抑菌纤维膜，研究结果表明：

(1) 最佳静电纺丝工艺为：纺丝液中 PAN 质量分数为 14%，纺丝电压为 12 kV，纺丝推注速率为 0.4 mL/h，五味子红色素含量为 200 mg。最佳工艺下的五味子纤维平均直径为(243.86 ± 0.95) nm，纤维形貌均匀，无液滴或纺锤状纤维出现，孔隙均匀。

(2) 五味子纤维膜对于白念珠菌、金黄葡萄球菌、大肠杆菌均有抑制效果，对 3 种菌的抑制作用排序为白念珠菌>金黄葡萄球菌>大肠杆菌，在抑菌实验的第 56 h 时五味子红色素纳米纤维膜对白念珠菌的抑制率达 33.87%。

(3) 五味子抗菌纤维膜浸泡在蒸馏水中 8 h，红色素与纤维膜结合稳定不易释放损失。

综上所述，五味子红色素纳米抗菌纤维膜性状稳定，成分天然，具有潜在的抑菌效果，可由此扩展五味子红色素的应用领域，为五味子红色素在抑菌敷料等领域的应用提供新的方法及理论基础。

参考文献:

[1] LI H, CHEN X, LU W, et al. Application of electrospinning in antibacterial field[J]. Nanomaterials, 2021, 11(7): 1822.

[2] YANG S, ZHANG X H, ZHANG D W. Electrospun chitosan/poly (vinyl alcohol)/graphene oxide nanofibrous membrane with ciprofloxacin antibiotic drug for potential wound dressing application[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(18): 4395.

[3] RAMALINGAM R, DHAND C, MAYANDI V, et al. Core–shell structured antimicrobial nanofiber dressings containing herbal extract and antibiotics combination for the prevention of biofilms and promotion of cutaneous wound healing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(21): 24356–24369.

[4] 石依姗, 方建国, 施春阳, 等. 二氢杨梅素抗菌、抗病毒作用的研究进展[J]. 现代药物与临床, 2021, 36(2): 408–413.
SHI Y S, FANG J G, SHI C Y, et al. Research progress on antibacterial and antiviral activities of dihydromyricetin [J]. Drugs & Clinic, 2021, 36(2): 408–413(in Chinese).

[5] 祝寅淏, 王帅, 李瑶, 等. 黄酮类化合物药理作用的研究进展[J]. 吉林医药学院学报, 2018, 39(3): 219–223.
ZHU Y H, WANG S, LI Y, et al. Research progress of flavonoids pharmacological effects[J]. Journal of Jilin Medical University, 2018, 39(3): 219–223(in Chinese).

[6] 王雪, 刘景楠, 夏顺利, 等. 中药总黄酮抗肿瘤活性及机制的研究现状[J]. 中国临床药理学杂志, 2021, 37(4): 484–486,496.
WANG X, LIU J N, XIA S L, et al. Research status of anti–tumor activity and mechanism of total flavonoids of traditional Chinese medicine[J]. The Chinese Journal of Clinical Pharmacology, 2021, 37(4): 484–486,496(in Chinese).

[7] 沈建忠,朱奎,丁双阳. 植物来源的黄酮抗菌化合物及其应用: 中国, 202110001827.4[P]. 2022–05–24.
SHEN J Z, ZHU K, DING S Y. Plant–derived flavonoid antimicrobial compounds and their applications: China, 20211000–1827. 4[P]. 2022–05–24(in Chinese).

[8] MA C H, YANG L, YANG F J, et al. Content and color stability of anthocyanins isolated from Schisandra chinensis fruit[J]. International Journal of Molecular Sciences A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 657: 130638.

[9] SONG L Y, CUI S M, LI T, et al. Antibacterial effects of *Schisandra chinensis* extract on *Staphylococcus aureus* and its application in food[J]. Journal of Food Safety, 2018, 38(5): e12503.

[10] KIM S H, JOO M H, YOO S H. Structural identification and antioxidant properties of major anthocyanin extracted from Omija (*Schizandra chinensis*) fruit[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(2): C134–C140.

[11] JUNG S, MOON H I, KIM S, et al. Anticancer activity of gomisin J from *Schisandra chinensis* fruit[J]. Oncology Reports, 2019,41(1):711–717

[12] GUO M M, LU Y, YANG J P, et al. Inhibitory effects of *Schisandra chinensis* extract on acne–related inflammation and UVB–induced photoageing[J]. Pharmaceutical Biology, 2016, 54(12): 2987–2994.

[13] SILL T J, VONRECUM H A. Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering[J]. Biomaterials, 2008, 29(13): 1989–2006.

[14] 叶佩雯, WEI S Y, 魏凤环. 静电纺丝载药纤维及其在经皮递药系统中的研究进展[J]. 中国药学杂志, 2019, 54(24): 2034–2042.
YE P W, WEI S Y, WEI F H. Progress of electrospinning drug–loaded fibers and application in transdermal drug delivery system[J]. Chinese Pharmaceutial Journal, 2019, 54(24): 2034–2042(in Chinese).

[15] YANG Q, GUO J, ZHANG S, et al. PVA/PEO/PVA–g–APEG nanofiber membranes with cytocompatibility and anti–cell adhesion for biomedical applications[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 657: 130638.

[16] HUANG J, ZHOU X B, SHEN Y B, et al. Asiaticoside loading into polylactic–co–glycolic acid electrospun nanofibers attenuates host inflammatory response and promotes M2 macrophage polarization[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2020, 108(1): 69–80.

[17] ZHAO X H, NIU Y N, MI C H, et al. Electrospinning nanofibers of microbial polyhydroxyalkanoates for applications in medical tissue engineering[J]. Journal of Polymer Science, 2021, 59(18): 1994–2013.

[18] JI X B, GUO J, GUAN F C, et al. Preparation of electrospun polyvinyl alcohol/nanocellulose composite film and evaluation of its biomedical performance[J]. Gels, 2021, 7(4): 223.

[19] 张树智, 曲鹏飞, 韩俊泉, 等. 静电纺丝构建中药控释系统的研究及应用[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(17):2759–2765.
ZHANG S Z, QU P F, HAN J Q, et al. Research and application of electrospinning drug delivery systems containing traditional Chinese medicine[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2024, 28(17): 2759–2765(in Chinese).

[20] 国家卫生健康委员会. 抗菌和抑菌效果评价方法 WS/T 650—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
National Health Commission. Evaluting method for efficacy of antibacterial and bacteriostasis WS/T 650–2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).

本文引文格式:

郭文娟, 任和, 张颖, 等. 五味子红色素纳米纤维膜的制备及其抗菌性能[J]. 天津工业大学学报,2025, 44(5): 8–15.
GUO W J, REN H, ZHANG Y, et al. Preparation of *Schisandra chinensis* red pigment nanofiber membrane and its antimicrobial properties[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(5): 8–15(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)