

# 聚乳酸/亚硝酸盐发色纤维包装的制备及其释放行为

张悦, 刘晓娟, 孙武亮, 王潮姿, 董同力嘎, 孙文秀  
(内蒙古农业大学 食品科学与工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** **目的** 通过静电纺丝技术制备发色纤维材料, 为冷鲜肉护色提供理论基础。**方法** 利用静电纺丝技术将可生物降解的 PLA 和具有良好发色作用的  $\text{NaNO}_2$  混合以制备发色纤维。研究不同工艺参数对纤维形貌的影响, 根据 SEM 结果选取纤维形貌的最佳条件, 并添加  $\text{NaNO}_2$  制备发色纤维。采用 FT-IR 及静态接触角对制备纤维的组分和亲水性进行分析, 并测试纤维的释放性能。**结果** 随着收集距离、电纺速度的增加, PLA 纤维的平均直径会降低; 随着电压的增加, 聚乳酸纤维的平均直径先增加后降低。得到了适宜的纺丝工艺参数, 电压为 15 kV, 纺丝速度为 0.5 mL/h, 接收距离为 25 cm。随着  $\text{NaNO}_2$  含量的增加, 聚乳酸亚硝酸钠纤维的平均直径会降低; 随着  $\text{NaNO}_2$  的添加, 对纤维亲水性影响不明显; 当  $\text{NaNO}_2$  含量增加时, 释放时间会延长, 该膜中  $\text{NaNO}_2$  的释放速率则降低。**结论** 通过静电纺丝技术制得了聚乳酸亚硝酸钠发色纤维, 其具有优秀的缓释效果, 可以应用于肉及肉制品的发色包装。

**关键词:** 静电纺丝; 发色纤维; 缓释

中图分类号: TQ343 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0081-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.012

## Preparation and Release Behavior of Polylactic Acid/Nitrite Color Protective Fiber Packaging

ZHANG Yue, LIU Xiao-juan, SUN Wu-liang, WANG Chao-zi, DONG Tungalag, SUN Wen-xiu  
(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide theoretical basis for color protection of chilled meat by preparing the color protective fiber materials with the electrospinning technology. The electrospinning technology was used to mix the biodegradable PLA and  $\text{NaNO}_2$  having good color protection to prepare the color protective fiber. The effects of different process parameters on the morphology of the fibers were studied. According to the SEM results, the optimal conditions of fiber morphology were selected and  $\text{NaNO}_2$  was added to prepare the color protective fibers. The composition and hydrophilicity of the prepared fibers were analyzed through FT-IR and static contact angles, and the fiber release properties were also tested. It was found that, with the increase of collection distance and electrospinning speed, the average diameter of PLA fiber decreased; with the increase of voltage, the average diameter of polylactic acid fiber increased first and then decreased. Suitable spinning process parameters were obtained: voltage of 15 kV, spinning speed of 0.5 mL/h, and receiving distance of 25 cm. With the increase of  $\text{NaNO}_2$  content, the average diameter of polylactic acid sodium nitrite fiber decreased. With the addition of  $\text{NaNO}_2$ , the effect on hydrophilicity of fiber was not obvious. When the content of  $\text{NaNO}_2$  increased, the release time prolonged, and the release rate of  $\text{NaNO}_2$  in the film was reduced. Polylactic acid sodium nitrite

收稿日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (31760481)

作者简介: 张悦 (1992—), 女, 内蒙古农业大学硕士生, 主攻肉品发色纤维的制备及应用。

通信作者: 孙文秀 (1979—), 男, 博士, 内蒙古农业大学教授, 主要研究方向为食品智能包装。

color-developing fiber is prepared by electrospinning technology, which has excellent sustained release effect and can be applied to color protective packaging of meat and meat products.

**KEY WORDS:** electrospinning; color protective fiber; sustained release

肉是饮食中的重要组成部分,人们可以从中获取丰富的营养物质,维持日常消耗。肉的品质主要由外观、物性和风味来判断。其中肉色是消费者衡量肉品质的重要指标,良好的色泽可以刺激消费者的购买欲<sup>[1]</sup>,且在无法接触的状况下,颜色是消费者判断质量的唯一标准。当肉褪色时就被认为不新鲜和不卫生<sup>[2]</sup>,进而导致部分肉品在销售过程中出现滞销现象<sup>[3]</sup>,由此可知肉的发色研究非常重要。

亚硝酸盐是一种非常优秀的肉品发色剂,使用亚硝酸盐发色、防腐已有数百年历史<sup>[4]</sup>。直至今日,仍未发现有能完全代替亚硝酸盐的发色剂。亚硝酸盐在酸性条件下可以生成亚硝酸,进而分解成亚硝基<sup>[5]</sup>。亚硝基虽可以与肌红蛋白反应生成具有明亮颜色的亚硝基肌红蛋白,给人以良好的感官<sup>[6]</sup>,但亚硝酸盐的用量需要严格控制,过量使用亚硝酸盐可能会产生致癌物亚硝胺<sup>[7]</sup>。

静电纺丝纤维制备技术可以将功能性分子负载到天然可降解型材料上,在食品包装保鲜、提高消费者购买欲方面具有很大意义<sup>[8]</sup>。静电纺丝原理是在静电场作用下,将非牛顿流体从正极迁引到负极得到纤维丝<sup>[9]</sup>。静电纺丝纤维仅有微米至纳米尺寸,与一般的功能性材料相比,静电纺丝纤维可作为负载载体,不仅其负载物稳定性高,且具有表面积大、孔隙率高、易操作、设备简易、负载量高、缓释控释等优点,在释放系统中有很大优势<sup>[10]</sup>。静电纺丝纤维释放体系可以改善存在于普通释放系统中负载量低和负载物突释的问题,且其主体基材一般均为环境友好材料,不会对生态环境造成负担<sup>[11]</sup>。

文中研究使用静电纺丝技术将亚硝酸钠负载到可降解材料聚乳酸中,制备聚乳酸亚硝酸钠发色纤维。纺丝工艺会影响纤维的直径分布,进而影响材料发色性能,因此使用 SEM 研究纺丝参数对纤维直径和形貌的影响,进而获得聚乳酸亚硝酸钠发色纤维膜的最佳工艺。采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)仪及静态接触角对制备纤维的组分和亲水性进行分析,利用紫外分光光度计检测亚硝酸钠的释放行为。为聚乳酸亚硝酸钠纤维护色膜的进一步应用研究提供一定理论基础。

## 1 实验

### 1.1 试剂与仪器

主要试剂有聚乳酸(PLA,  $M_w=100\ 000$ , 美国

Nature Works 公司)、亚硝酸钠(西陇化工股份有限公司)、氯仿(分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF,分析纯,麦克林试剂公司)、亚硝酸钠标准使用液(麦克林试剂公司)、硼砂(分析纯,天津南开允公合成技术有限公司)、亚铁氰化钾(分析纯,麦克林试剂公司)、乙酸锌(分析纯,天津市盛奥化学试剂有限公司)、对氨基苯磺酸(分析纯,天津市福晨化学试剂厂)、盐酸萘乙二胺(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

主要仪器有静电纺丝机(TL-F6,中国通力微纳科技有限公司)、傅里叶红外光谱仪(IRAffinity-1,日本岛津公司)、紫外分光光度计(UV-2450,日本岛津公司)、色差仪(CR-20,日本柯尼卡美能达有限公司)、胴体 pH 计(pH-STAR,德国麦特斯公司)、扫描电镜(TM4000,日本日立高新技术公司)、接触角测定仪(JY-PHa,承德优特检测仪器制造有限公司);真空干燥箱(DZF-6090,上海一恒科学仪器有限公司)、恒温磁力搅拌器(MYP11-2A,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司)、双功能水浴恒温摇床(SHA-B,江苏金坛市宏华仪器厂)。

### 1.2 静电纺丝溶液的配置

将 0.18 g 的  $\text{NaNO}_2$  溶于 10 mL 的 DMF 中,使用旋涡震荡仪震荡至完全溶解,得到质量分数为 1.8% 的均匀  $\text{NaNO}_2$  母液。随后取 6.5 g 聚乳酸颗粒溶于 50 mL 氯仿溶液中,在室温下磁力搅拌 8 h,得到质量分数为 13% 的均匀纺丝液。质量分数为 1.8% 的  $\text{NaNO}_2/\text{DMF}$  溶液与质量分数为 13% 的 PLA 溶液以体积比为 10:2, 10:1, 10:0.6, 10:0.3 的配比混合均匀,得到不同体积配比负载  $\text{NaNO}_2$  的纺丝液。

### 1.3 纤维的制备

往 15 mL 质量分数为 13% 的 PLA 纺丝液加入 1 mL 的 DMF,磁力搅拌 15 min;将得到的均匀纺丝溶液装入注射器内,尽量排除气泡,安装到 TL-F6 静电纺丝机上;注射器通过聚四氟乙烯管连接到针头上,连接高压发生装置;最后采用铝箔纸覆盖的接地平板电极作为纤维接收装置。采用单因素实验,研究纺丝电压、收集距离和速度对 PLA 纤维形态的影响,设定电压分别为 8, 10, 15, 20, 25 kV, 收集距离分别为 15, 20, 25, 30, 35 cm, 推进速度为 0.3, 0.5, 0.8, 1.0 mL/h。纺丝针头外径为 0.91 mm、内径为 0.61 mm, 纺丝温度约为 20 °C, 纺丝相对湿度约为 30%。最后将得到的纤维在真空干燥箱中烘干 1 h。

## 1.4 扫描电镜测定 (SEM)

采用 TM4000 扫描电子显微镜观察纤维的微观形貌。取长宽大小一致的静电纺丝纤维膜,置于导电胶表面;再用溅射仪对其进行纤维膜表面真空喷金处理,在加速电压为 15 kV 的条件下,用扫描电子显微镜拍摄不同放大倍数的照片,观察纤维的微观形貌变化。用 Nano Measurer 测量纤维的平均直径,每个样品至少取 100 根纤维。采用 Origin 8 绘制较为直观的直径分布图。

## 1.5 静态接触角测定

采用接触角测定仪测定纤维表面的润湿性能。取长宽大小一致的 PLA 纤维膜。首先在样品上滴加去离子水滴,稳定后采用高速摄像机进行拍摄,计算出其接触角数值。每个样品平行测 5 次,求平均值。

## 1.6 傅里叶红外光谱分析 (FT-IR)

采用傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 对样品进行红外光谱分析。将亚硝酸盐样品与溴化钾 (KBr) 混合,压成片。将制备好的纤维膜剥离铝箔,附着在红外光谱测试仪的样品台上。分别记录样品在 400~4000  $\text{cm}^{-1}$  的红外吸收光谱。

## 1.7 震荡加速释放实验

采用傅里叶红外光谱测定膜的震荡加速释放实验。设定摇床温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ ,震荡速度为 100 r/min。将制得的亚硝酸盐纤维膜样品取 0.015 g 膜置于 100 mL 锥形瓶中,添加 30 mL 蒸馏水。定时取样 3 mL 于试管中,并补充 3 mL 蒸馏水,添加 200  $\mu\text{L}$  的对氨基苯磺酸,3 min 后添加 100  $\mu\text{L}$  的盐酸萘乙二胺。在 538 nm 处测定其吸光度。最后绘制以时间为横坐标,以 538 nm 处的吸光度 (采用紫外分光光度法测定) 为纵坐标的曲线。

第  $N$  次取样时,累计释放量按式 (1—2) 计算:

$$Q_n = C_n V + V_1 (C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_{n-1}) \quad (1)$$

$$q = Q_n / Q_{\text{总}} \quad (2)$$

式中:  $Q_n$  为第  $n$  次取样时药物的累计释放量 ( $\mu\text{L}$ );  $C_n$  为第  $n$  次取样时溶液的含药量 ( $\mu\text{L}/\text{mL}$ );  $V$  为溶液的体积 ( $\text{mL}$ );  $V_1$  为每次取样的体积 ( $\text{mL}$ );  $q$  为累计释放率 (%);  $Q_{\text{总}}$  为负载总量 ( $\mu\text{L}$ )。取 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1 mL 标准品定量添加到 30 mL 的水中,添加 200  $\mu\text{L}$  的对氨基苯磺酸,3 min 后添加 100  $\mu\text{L}$  的盐酸萘乙二胺,静置 15 min 后在 538 nm 处测定其吸光度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纺丝电压对纤维形貌的影响

在不同电压下制备的聚乳酸纤维 SEM 及对应的

直径分布见图 1,其中维持距离为 25 cm,速度为 0.5 mL/h,电压依次为 8, 10, 15, 20, 25 kV。由图 1 可知,随着纺丝电压从 8 kV 增加至 25 kV (小于 8 kV 时,纤维无法成型),聚乳酸纤维直径的分布均匀性提高,且平均直径呈现先升高后降低的趋势。当纺丝电压为 8 kV (见图 1a) 时,纤维直径较细 (平均纤维直径仅为 1.44  $\mu\text{m}$ ),这是因为电纺电压较低,其静电力不足以克服纺丝液的表面张力,纺丝液不能顺利地破裂成丝<sup>[12]</sup>。当纺丝电压为 10 kV 到 15 kV 时 (见图 1b—c),纤维直径增加。这是由于电压升高导致纺丝溶液中电荷增加,因此射流拉伸力变大,射流到接收板的时间变短。在电压较低的情况下,射流表面的电荷斥力和电场力虽可以克服聚合物溶液的黏应力,但又由于电场力较小且加速度较小,进而导致纤维直径较大,直径不均匀、分布较乱<sup>[13]</sup>。当电压增加至 15 kV 以上时 (见图 1d—e),电场的拉伸力变大,射流的加速度增加,虽然射流的飞行时间变短,但电场作用力大,射流加速度大,进而导致纤维的直径降低。射流鞭动范围小且飞行相对集中、分布范围小,因此纤维直径较为均匀。当电压继续增大至 25 kV 时 (见图 1e),电场强度增加,电荷密度也随之增加,过大的电场强度会造成射流加速度变大,牵引力增加,射流飞行、鞭动时间缩短,以致纤维在到达接收板前没有充分拉伸,造成其直径极不均匀。

### 2.2 纺丝距离对电纺纤维形貌的影响

在不同距离下制备的聚乳酸纤维 SEM 形貌与直径分布见图 2。维持速度为 0.5 mL/h,电压为 15 kV,距离依次为 15, 20, 25, 30, 35 cm。由图 2 可知,随着距离增大,纤维的直径在不断降低。这是由于在静电纺丝过程中,纤维的接收距离会直接影响电场强度,也会影响射流在电场中的拉伸程度和飞行时间,接收距离越长其所受到的电场强度越小。当接收距离为 15 cm 时 (见图 2a),纤维存在螺旋结构,这是因为纺丝射流在电场中受到拉伸力的作用,在拉伸过程中溶剂不断挥发,要有足够的距离才能使其完全挥发,如果距离小于射流长度,收集到的纤维将残留大量溶剂,纤维未能拉伸完全,导致有部分螺旋状纤维产生<sup>[14]</sup>。当随着距离增加至与射流长度相符时,得到的纤维较为均匀。当接收距离为 25 cm 时 (见图 2c),纤维到达接收板时刚好拉伸结束,溶剂挥发完全,所以纤维均匀且纵向性好。当接收距离大于 30 cm 时 (见图 2d—e),由于其射流飞行、鞭动时间增加,纤维的拉伸和溶剂挥发时间增加,使纤维得到了充分拉伸,在到达接收板前纤维已凝固,进而导致纤维直径降低。

### 2.3 纺丝速度对电纺纤维形貌的影响

在不同纺丝速度条件下制备的聚乳酸纤维 SEM

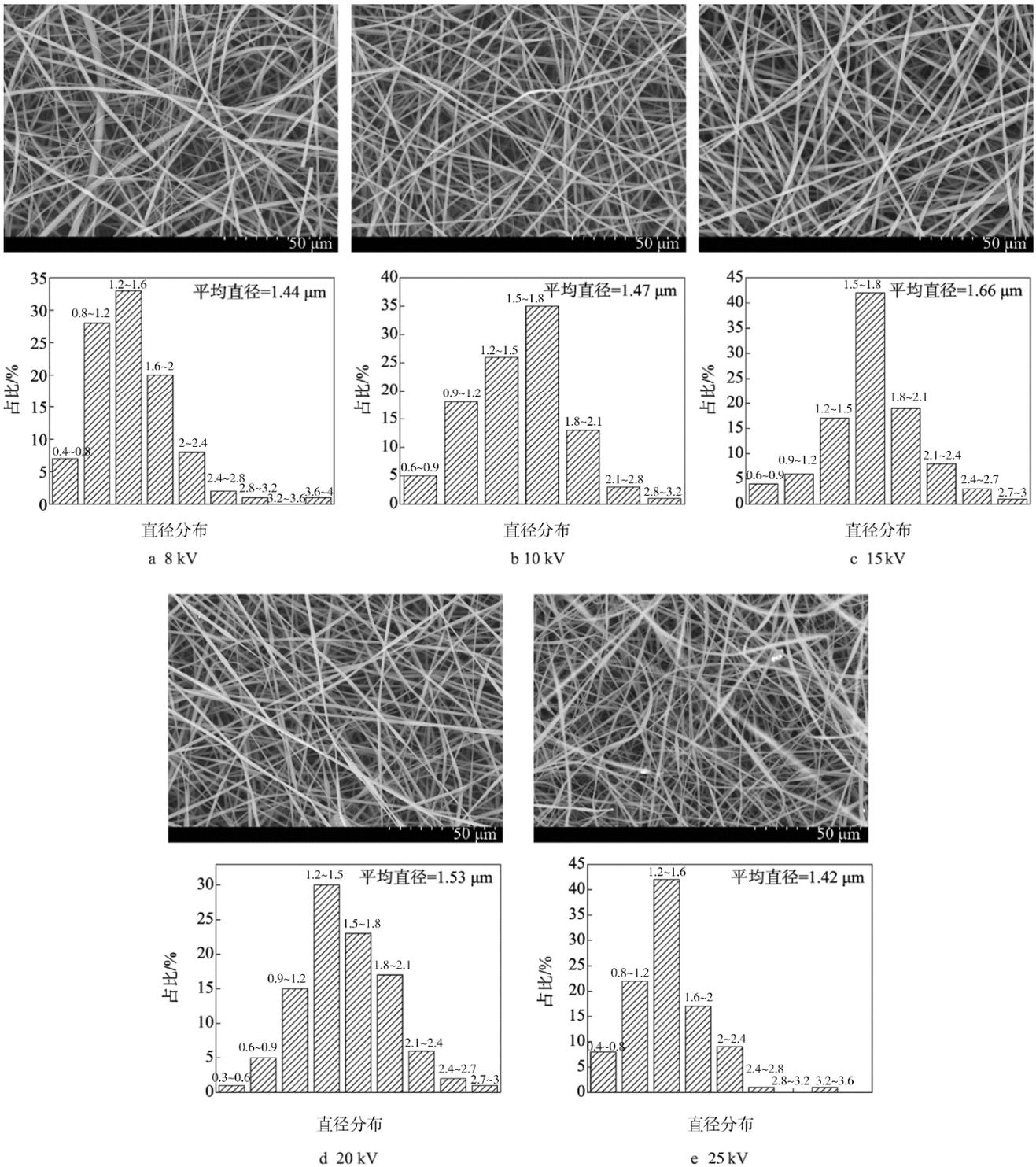


图 1 不同纺丝电压下纤维 SEM 形貌及相应直径分布

Fig.1 SEM images and corresponding diameter distribution of fibers under different spinning voltages

形貌与直径分布见图 3。维持距离为 25 cm，电压为 15 kV，速度依次为 0.3，0.5，0.8，1.0 mL/h。由图 3 可知，随着纺丝速度的增加，纤维直径也在增加（见图 3a—d）。这是由于在电压一定的情况下，当纺丝速度太低时，泰勒锥不稳定，射流的不稳定性就增加，进而影响了纤维的形貌结构。当纺丝速度增加时，从泰勒锥表面喷射出的溶液量也会增加，聚合物固化需

要的时间也延长，溶剂无法挥发完全，进而导致纤维直径增加。

### 2.4 纺丝亚硝酸钠添加量对电纺纤维形貌的影响

在不同亚硝酸盐含量下制备的聚乳酸纤维 SEM 形貌与直径分布见图 4。维持速度为 0.5 mL/h，电压

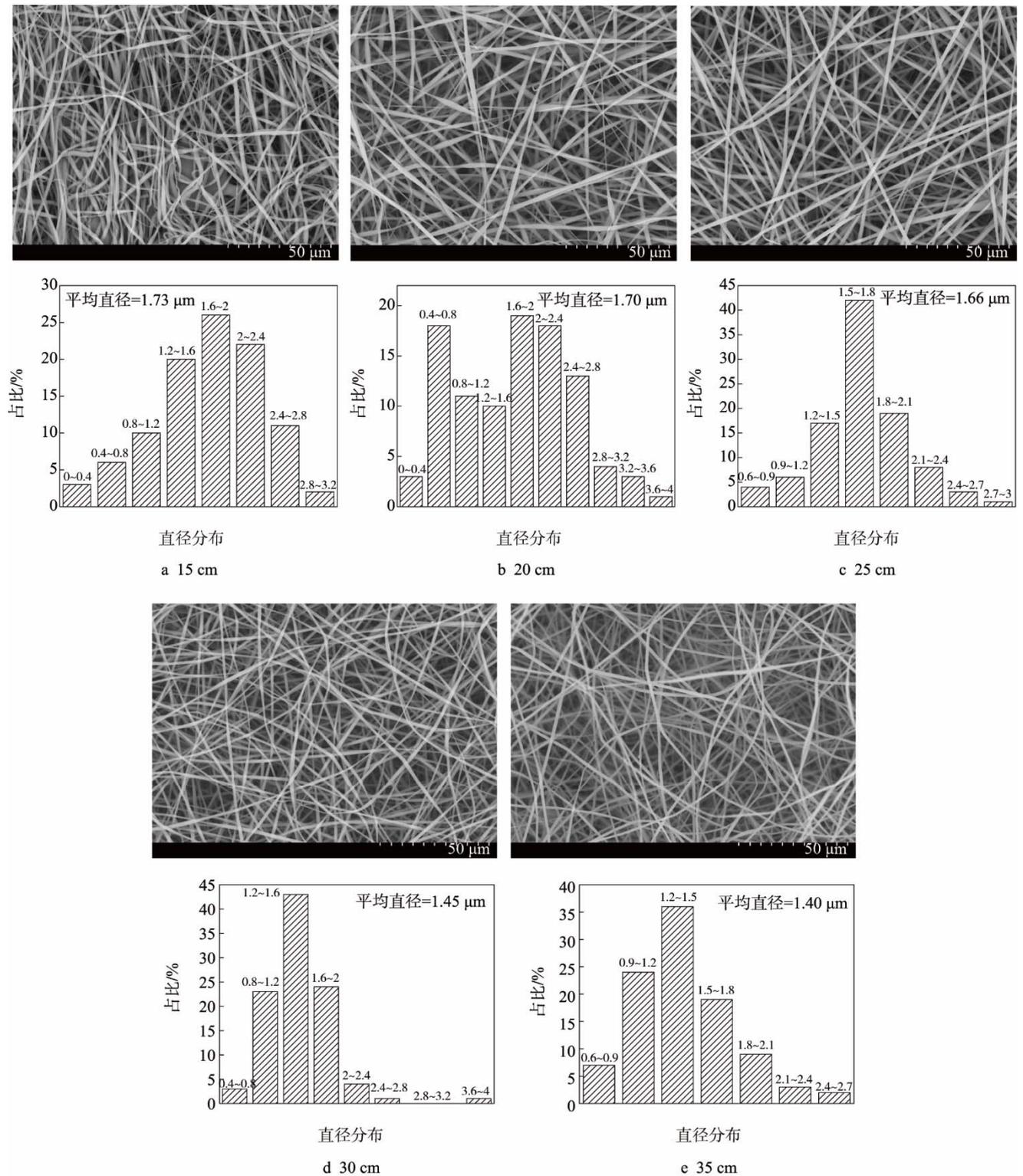


图 2 不同纺丝距离下纤维 SEM 形貌及相应直径分布

Fig.2 SEM images and corresponding diameter distribution of fibers at different spinning distances

为 15 kV，距离为 25 cm，改变 PLA/NaNO<sub>2</sub> 体积比，依次为 0 : 0.3, 10 : 0.6, 10 : 1, 10 : 2。由图 4 可知，随着亚硝酸盐和 PLA 的体积比增加(见图 4a—d)，纤维有更好的形态，纤维直径持续降低，且降低效果非常显著。这主要是由于纺丝液中 DMF 含量增加，增加了纺丝液的极性，因此在相同条件下，牵引力增大<sup>[15]</sup>。

此外，亚硝酸钠的添加增加了纺丝液的电导率，导致射流表面的电荷密度增加，受到了更强的拉伸力，进而导致纤维直径更细。同时随着溶液中盐离子数目增多，导致同种电荷之间的排斥力增大，造成纤维在被收集之前分叉，进而导致直径变小。当亚硝酸钠添加量增大时，纤维表面逐渐出现裂纹以及发生断裂。

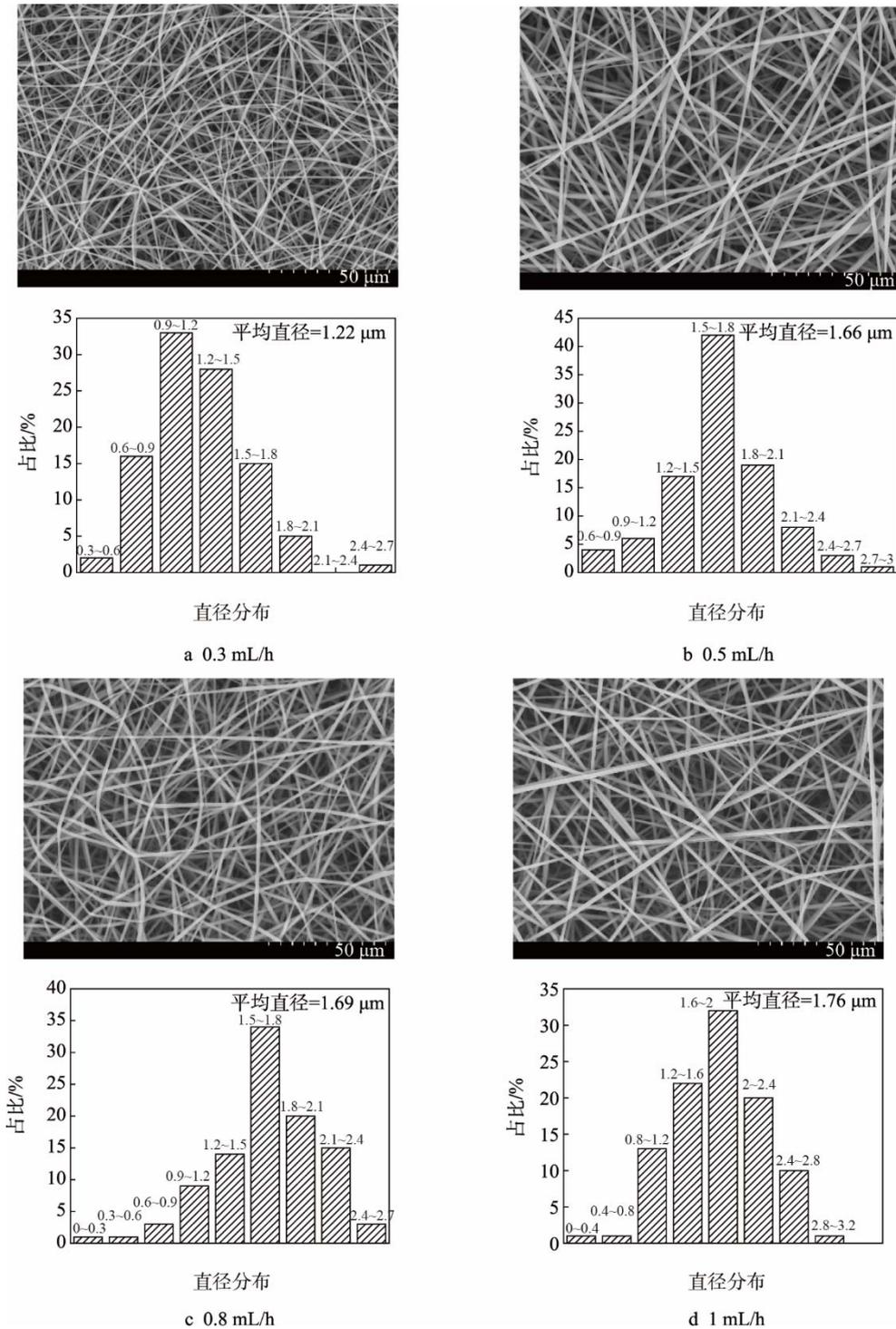


图3 不同纺丝速度下纤维 SEM 形貌及相应的直径分布  
Fig.3 SEM images and corresponding diameter distribution of fibers at different spinning speeds

### 2.5 纤维静态接触角测定

在不同体积比下制备的 PLA/NaNO<sub>2</sub> 纤维膜的接触角见图 5。由图 5 可知,随着 NaNO<sub>2</sub> 含量的增加,聚乳酸亚硝酸钠纤维膜的接触角从 105° 降到 95°, 纯 PLA 纤维 (10 : 0) 的接触角为 105.08°, PLA/NaNO<sub>2</sub> (10 : 0.3) 纤维膜的接触角为 100.6°, PLA/NaNO<sub>2</sub>

(10 : 0.6) 纤维膜的接触角为 97.54°, PLA/NaNO<sub>2</sub> (10 : 1) 纤维膜的接触角为 96.7°, PLA/NaNO<sub>2</sub> (10 : 2) 纤维膜的接触角为 96°。虽然降低幅度较小,但总体呈现下降趋势。这可能是因为 NaNO<sub>2</sub> 含量较少,其中所含的盐离子较少,进而对纤维的亲水性影响则较小、作用不明显<sup>[16]</sup>。随着亚硝酸钠的添加量增大,会造成纤维出现裂纹及发生断裂,也会导致接触角下降。

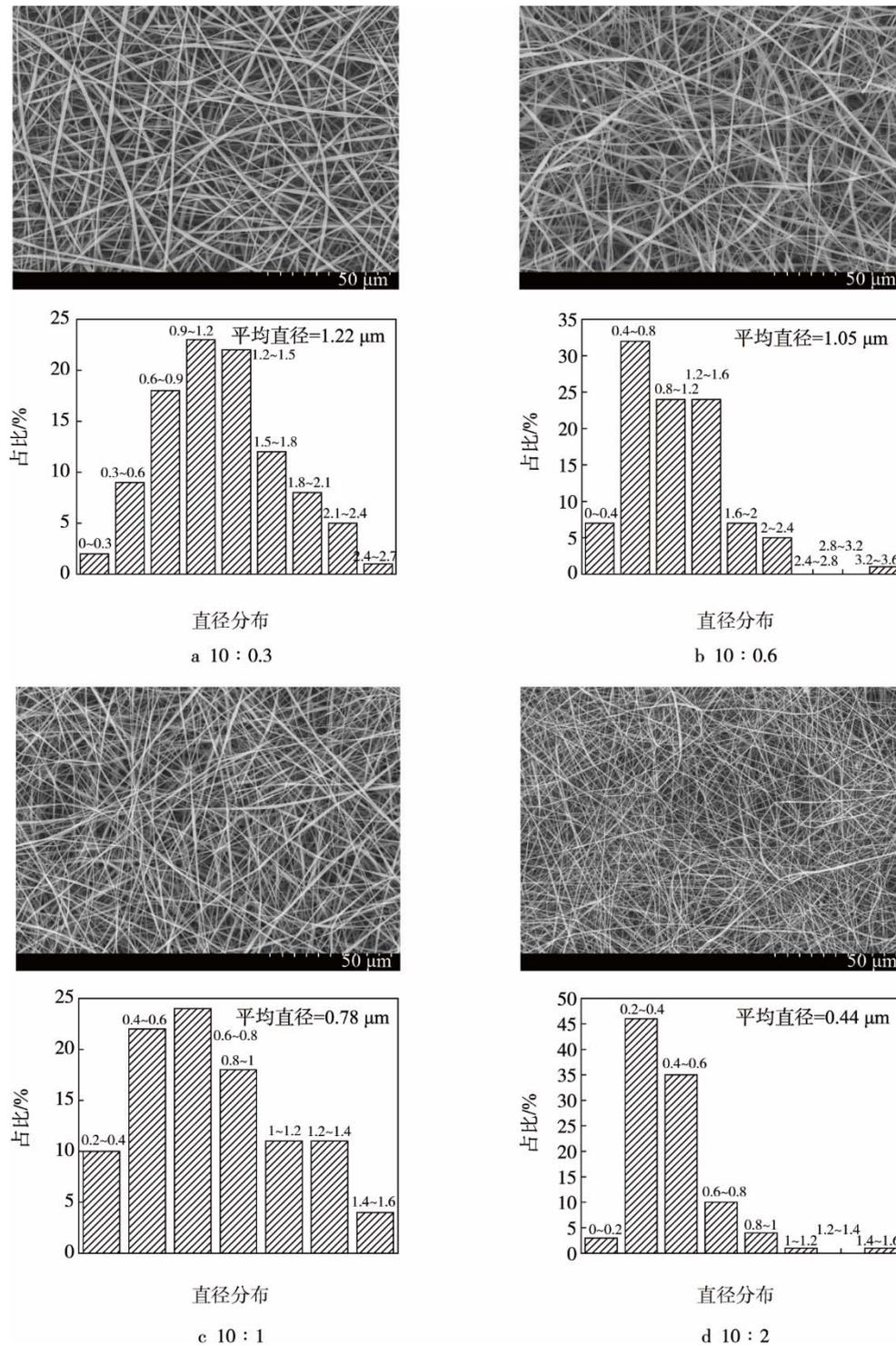


图 4 不同亚硝酸盐含量下纤维 SEM 形貌及相应的直径分布

Fig.4 SEM images and corresponding diameter distribution of fibers under different nitrite contents

## 2.6 纤维的傅里叶红外光谱分析 (FT-IR)

为了进一步研究添加  $\text{NaNO}_2$  对 PLA 静电纺丝纤维膜的影响,对含有、不含  $\text{NaNO}_2$  的 PLA 纳米纤维膜和  $\text{NaNO}_2$  进行了红外光谱 (FT-IR) 表征,结果见图 6。由图 6 可知,PLA 纤维的 FT-IR 光谱在 1757, 1193, 1093  $\text{cm}^{-1}$  处为特征吸收波段,代表 PLA 的主

干酯基<sup>[17]</sup>。在 PLA 中,1751  $\text{cm}^{-1}$  处的强吸收峰是由于 C=O 的特征吸收带所致。1193  $\text{cm}^{-1}$  为 C—O—C 中 C—O 键的伸缩振动吸收峰,1093  $\text{cm}^{-1}$  为 C—O—H 中 C—O 吸收峰<sup>[18]</sup>。与空白 PLA 相比,负载  $\text{NaNO}_2$  的纤维膜在 1232, 1330 (有微量偏移)  $\text{cm}^{-1}$  处出现了属于  $\text{NaNO}_2$  的特征波峰,这表明  $\text{NaNO}_2$  已成功负载到 PLA 上。

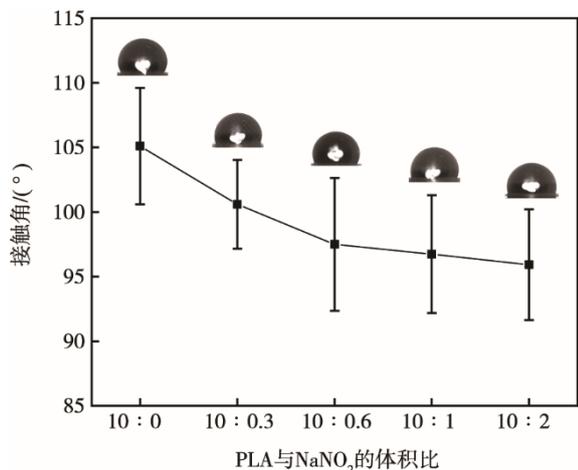


图5 不同体积比下 PLA/NaNO<sub>2</sub> 纤维膜的接触角  
Fig.5 Water contact angle of PLA/NaNO<sub>2</sub> fiber membrane at different volume ratios

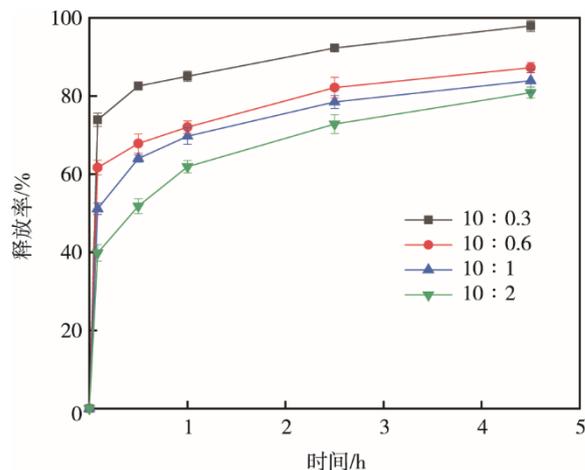


图7 不同亚硝酸钠含量下 PLA/NaNO<sub>2</sub> 纤维膜在水中的释放曲线  
Fig.7 Release curve of PLA/NaNO<sub>2</sub> fiber membrane in water under different sodium nitrite contents

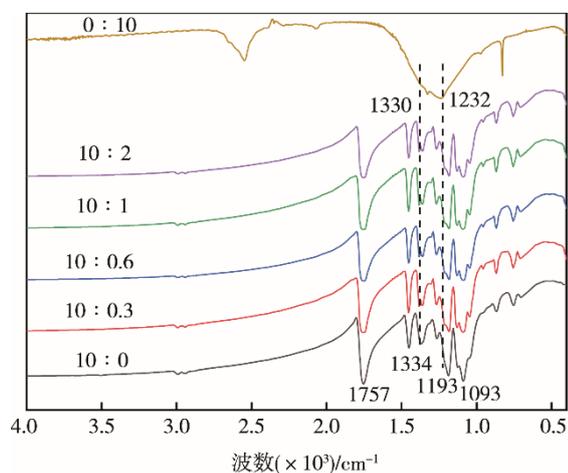


图6 不同体积比下 PLA/NaNO<sub>2</sub> 纤维膜的红外光谱图  
Fig.6 Infrared spectrum of PLA/NaNO<sub>2</sub> fiber membrane at different volume ratios

### 3 结语

采用静电纺丝技术制备了聚乳酸亚硝酸钠发色纤维,研究了纺丝电压、收集距离及纺丝速度对纤维形态、直径分布和平均直径的影响。探讨了 PLA 与 NaNO<sub>2</sub> 的体积比对纤维亲水性能的影响,并分析了 NaNO<sub>2</sub> 含量对聚乳酸亚硝酸钠纤维膜形态和释放速率的影响。在对工艺参数分析后,得到适宜的纺丝工艺参数:电压为 15 kV,纺丝速度为 0.5 mL/h,接收距离为 25 cm。随着 NaNO<sub>2</sub> 含量增加,虽然聚乳酸亚硝酸钠纤维膜的直径降低,但对亲水性能的影响不明显。聚乳酸亚硝酸钠纤维膜在释放初期具有较快的释放速率,随 NaNO<sub>2</sub> 含量增加,其释放率降低,有较好的缓释性能。综上所述,静电纺丝发色纤维膜有望在肉品发色护色方面有较好效果。

### 2.7 震荡加速释放实验

不同亚硝酸钠含量下 PLA/NaNO<sub>2</sub> 纤维膜在水中的释放曲线见图 7。由图 7 可知,在释放初期,处于纤维突释阶段,聚乳酸亚硝酸盐纤维膜的释放速率较快,这可能是由于亚硝酸钠具有较高的离子能,在静电纺丝过程中较易吸附于纤维表面,导致在释放初期释放速率较快。随着释放时间的增加,纤维表面的亚硝酸钠释放完毕后,在纤维内部的亚硝酸钠逐渐被释放,随后水进入纤维内部,药物向外扩散时间较长,导致药物释放后期释放速率较慢<sup>[19]</sup>。随着负载量降低,纤维释放速率增大<sup>[20]</sup>,由 SEM 形貌可知,这是由于当负载量较低时,纤维平均直径较大、比表面积较小,且纤维表面药物含量较多,因此其药物释放速率增大。当负载量增加时,纤维直径减小,在相同厚度下,纤维间孔隙较小,与水接触的面积小,进而导致释放率减小。

### 参考文献:

- [1] 任可. 包装和光照对冷却肉颜色稳定性的影响研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.  
REN Ke. Influence and Analysis on Beef Color of Different Light Intensity[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.
- [2] MA J, YU C S, GUO J J, et al. The Intrinsic Cause of Color Fading in Sliced Cooked Cured Beef During Chilled Storage[J]. Animal Science Journal, 2017, 88(10): 1606—1614.
- [3] 李莉. 冷却肉品质变化及调控措施[J]. 肉类研究, 2010(8): 17—20.  
LI Li. Changes in the Quality of Chilled Meat and Control Measures[J]. Meat Research, 2010(8): 17—20.
- [4] 张素燕, 高爱武. 肉制品中亚硝酸盐替代物应用研究进展[J]. 肉类研究, 2016, 30(10): 45—48.  
ZHANG Su-yan, GAO Ai-wu. A Review of the

- Application of Nitrite Substitutes in Meat Products[J]. *Meat Research*, 2016, 30(10): 45—48.
- [5] 孙迪, 张志国. 低硝肉制品研究进展[J]. *中国调味品*, 2016, 41(6): 156—160.  
SUN Di, ZHANG Zhi-guo. Research Progress of Meat Product with Low Nitrite[J]. *China Condiment*, 2016, 41(6): 156—160.
- [6] CLAUS J R, DU C. Nitrite-embedded Packaging Film Effects on Fresh and Frozen Beef Color Development and Stability as Influenced by Meat Age and Muscle Type[J]. *Meat Science*, 2013, 95(3): 526—535.
- [7] YANG X, WOERNER D R, HASTY J D, et al. An Evaluation of the Effectiveness of Fresh Case Technology to Extend the Storage Life of Whole Muscle Beef and Ground Beef[J]. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(11): 4911—4920.
- [8] SHENG C H, ZHANG H D, CHEN S, et al. Fabrication, Structural and Humidity Sensing Properties of BaTiO<sub>3</sub> Nanofibers via Electrospinning[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2015, 29(12): 155.
- [9] BHARDWAJ N, KUNDU S C. Electrospinning: a Fascinating Fiber Fabrication Technique[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(3): 325—347.
- [10] 张盼, 潘凯. 结构可控串珠状异质纤维薄膜的制备及在药物释放领域的应用[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(7): 167—172.  
ZHANG Pan, PAN Kai. Preparation of Structure Controllable Bead-on-string Heterogeneous Fibers and its Application in Drug Release[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2018, 34(7): 167—172.
- [11] ESLAMIA M, KHORRAMI M, YI N, et al. Electrospinning of Highly Aligned Fibers for Drug Delivery Applications[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(2): 224—232.
- [12] 孟琳琳. 多孔中空聚乳酸纳米纤维制备及疏水亲油性性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.  
MENG Lin-lin. Porous Hollow Poly(lactic Acid) Nano Fiber Preparation and Hydrophobic Oil-wet Performance Research[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [13] 曹宽. 静电纺丝制备载药纤维及其药物释放性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.  
CAO Kuan. Experimental Research on Drug Loaded Fibers and Drug Release Properties by Melt Electrospinning[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [14] 李亚莉. 聚乳酸-聚乙二醇共聚物的合成及其静电纺丝研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.  
LI Ya-li. Study on the Synthesis and Electrospinning of Poly(lactide)-poly(ethylene Glycol) Copolymers[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2018.
- [15] 陈志, 罗军, 刘佳林, 等. 静电纺丝工艺对PVP/TEOS/硝酸盐复合纳米纤维成纤性状的影响[J]. *化工新型材料*, 2014(10): 202—204.  
CHEN Zhi, LUO Jun, LIU Jia-lin, et al. Influence of Different Electrospinning Process Parameters on Forming Property of PVP/TEOS/Nitrate Composite Nanofiber[J]. *New Chemical Materials*, 2014(10): 202—204.
- [16] 谭海涛, 刘铭辉, 刘涛, 等. 静电纺丝油水分离膜的制备及应用进展[J]. *黑龙江科学*, 2019, 10(4): 1—4.  
TAN Hai-tao, LIU Ming-hui, LIU Tao, et al. Recent Progress of Electrospun Oil/Water Separation Membranes: Fabrication and Applications[J]. *Helongjiang Science*, 2019, 10(4): 1—4.
- [17] 傅洪波, 尹朝辉, 朱恒强, 等. 聚乳酸材料表面处理及其应用[J]. *合成材料老化与应用*, 2018, 47(3): 12—15.  
FU Hong-bo, YIN Zhao-hui, ZHU Heng-qiang, et al. Surface Treatment of Polylactic Acid Materials and Its Application[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2018, 47(3): 12—15.
- [18] 刘明芳, 刘淑强, 张晓芳, 等. 聚乳酸手术缝合线的表面亲水改性研究[J]. *上海纺织科技*, 2018, 46(3): 25—27.  
LIU Ming-fang, LIU Shu-qiang, ZHANG Xiao-fang, et al. Hydrophilic Modification on Surface of Poly (Lactic Acid) (PLA) Surgical Suture[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2018, 46(3): 25—27.
- [19] 司军辉, 洪艺鸣, 林禄银, 等. 静电纺丝制备聚乙烯醇/纳米纤维素复合纤维及其作载体的释药性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(6): 916—920.  
SI Jun-hui, HONG Yi-ming, LIN Lu-yin, et al. Fabrication Poly(vinyl Alcohol) Nano Cellulose Composite Fiber Electrospinning and Its Drug Release[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2018, 36(6): 916—920.
- [20] HU X, LIU S, ZHOU G, et al. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Drug Delivery Applications[J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 185(27): 12—21.