

负载紫苏醛的聚乳酸纳米纤维膜对冷鲜羊肉保鲜效果的影响

Effects on the preservation of chilled mutton by using polylactic acid nanofiber films loaded with perillaldehyde

王德宝¹ 邹玉富² 李 佳³ 要 铎⁴ 李星云¹

WANG De-bao¹ ZOU Yu-fu² LI Jia³ YAO Duo⁴ LI Xing-yun¹

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院农产品加工所, 内蒙古 呼和浩特 010031; 2. 内蒙古锡林郭勒盟正镶白旗蒙盛肉业有限公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 013800; 3. 内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古 包头 014109; 4. 内蒙古自治区质量和标准化研究院, 内蒙古 呼和浩特 010017)

(1. Agricultural Products Processing Institute of Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 2. Mengsheng Meat Industry Co., Ltd., Zhengxiangbai Banner of Xilin Gol League, Inner Mongolia, Xilin Gol League, Inner Mongolia 013800, China; 3. Inner Mongolia Agricultural University, Vocational and Technical College, Inner Mongolia Baotou, Inner Mongolia 014109, China; 4. Inner Mongolia Institute of Quality and Standardization, Inner Mongolia Administration for Market Regulation, Hohhot, Inner Mongolia 010017, China)

摘要:目的:探究负载紫苏醛(PAE)对聚乳酸(PLA)抑菌包装力学特性及对冷鲜羊肉的保鲜效果。方法:通过负载不同量 PAE(0, 12.5, 25, 50, 100 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液)于 PLA 基质中,基于静电纺丝技术制备了具有一定吸水特性的抑菌纳米纤维包装膜,利用扫描电子显微镜、电子万能试验机等仪器对膜表面、机械性能以及保鲜过程中羊肉理化指标进行分析。结果:随着 PAE 负载量的增加,PAE-PLA 膜纳米纤维直径、断裂延伸率和抗拉强度现先增加后下降的趋势,说明 PAE 的添加可能改变了静电纺丝液表面电荷密度,影响纳米纤维直径,也改变了纳米纤维包装膜的断裂延伸率和抗拉强度;当 PAE 负载量为 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液时,PAE-PLA 膜纳米纤维分布均匀、直径最大(370 nm)且具有较好的机械性能(断裂延伸率 68.72%,抗拉强度 1.80 MPa)。贮藏 12 d,负载 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液的 PAE-PLA 膜包装的羊肉中总菌数和挥发性盐基氮含量分别 5.52 lg(CFU/g)、12.55 mg/100 g,显著低于新鲜肉与腐败肉的临界值

[6.0 lg(CFU/g)和 15.00 mg/100 g]($P < 0.05$)。结论:PAE 负载量为 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液的 PAE-PLA 抗菌包装膜具有较好抑菌效果,且该膜具有良好机械性能。

关键词:紫苏醛;聚乳酸;静电纺丝;纳米纤维膜;保鲜

Abstract: **Objective:** The purpose of the study was to investigate the antibacterial mechanical properties of PLA nanofiber film loaded with PAE and its preservation effect on chilled mutton. **Methods:** By loading different amount (0, 12.5, 25, 50, 100 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$) of electrospinning solution perillaldehyde (PAE) in polylactic acid (PLA) matrix, the antibacterial nanofiber film packaging with certain water absorption properties was prepared through electrospinning technology. The appearance and mechanical properties of PAE-PLA packaging film and physical-chemical indexes of mutton during preservation were analyzed via scanning electron microscopy and electronic universal testing machine. **Results:** With the increase of loading amount of PAE amount, the diameter, breaking elongation and tensile strength of PAE-PLA nanofiber films increased first and then decreased, which indicated that the addition of PAE can change the surface charge density of electrospinning solution. Therefore, the diameter of nanofibers was affected, and thereby the breaking elongation and tensile strength of nanofiber packaging films were changed. When the added PAE concentration was 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ of electrospinning solution, the PAE-PLA nanofiber films showed uniform distribution, a largest diameter (370 nm) with

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(编号:2021GG0347);内蒙古自治区农牧业科学院创新基金项目(编号:2022CXJJM08)

作者简介:王德宝,男,内蒙古农牧业科学院助理研究员,博士。

通信作者:李佳(1986—),女,内蒙古农业大学副教授,硕士。

E-mail: 1184693714@qq.com

收稿日期:2022-11-05 **改回日期:**2023-04-14

good mechanical properties, i.e., elongation at break of 68.72% and tensile strength of 1.80 MPa. After 12 days of storage, the total bacterial count and volatile salt nitrogen of mutton packaged with PLA membrane loaded with 50 μL PAE were 5.52 lg(CFU/g) and 12.55 mg/100 g, respectively, which are significantly lower than the critical values of fresh meat and spoilage meat [6.0 lg(CFU/g) and 15.00 mg/100 g] ($P < 0.05$). **Conclusion:** PAE-PLA film loaded with 50 μL / 20 mL PAE solution has good mechanical properties and antibacterial properties.

Keywords: perillaldehyde; polylactic acid; electrostatic spinning; nanofiber film; preservation

近年来,由于动物疫病爆发、消费者消费观念的转变等原因,冷鲜肉逐渐成为大众肉类消费的主体^[1]。在生产、运输和销售过程中,微生物污染是引起冷鲜肉质量下降和经济损失的主要因素。如何延长冷鲜肉货架期成为目前面临关键挑战^[2]。目前,基于生物可降解材料的包装是研究热点,其具有避免造成环境白色污染和良好生物相容性的特点,并通过负载抗菌物质可抑制微生物生长、延缓食品腐败变质^[3-4]。同时,抗菌物质包埋于生物基材料包装膜中可避免其单独使用因挥发或被食品快速消耗而浪费^[4]。因此,开发抗菌活性包装材料是保证新鲜食品质量、卫生品质和延长其货架期的重要途径。

随着包材制备技术的发展,借助静电纺丝技术将天然抗菌物质负载到生物基载体上制备纳米纤维膜是目前研究焦点。静电纺丝技术是一种简单、环保、经济的方法,可将不同的黏弹性聚合物溶液纺丝为纳米材料。聚合物溶液在高压静电场作用下通过克服表面张力产生带电射流,最终可固化形成具有比表面积大、质量轻、孔隙率高等特点的纳米纤维膜^[5-7]。膜中纳米纤维丝交错排列形成的 3D 空间网状结构有利于微生物等细胞的黏附,加之纳米纤维膜特殊结构对抗菌物质缓释递送作用,赋予膜材有效的抑菌防腐功能。鉴于其良好生物相容性及抗菌特性,纳米纤维膜逐步成为食品包装和许多其他应用的理想候选材料。

聚乳酸(Polylactic acid, PLA)是一种疏水、可生物降解的线性脂肪族聚酯,以玉米、甜菜糖、甘蔗糖为原料,经催化开环聚合和乳酸缩聚制备而成。因其良好的生物相容性、疏水性和可降解性,受到食品包装行业广泛的关注^[8]。以 PLA 为基材,负载不同活性物质制备的多种抗菌包装鲜有报道。Ardjoum 等^[9]报道称,地中海蜂胶乙醇提取物含量为 10% 的 PLA 膜对白色念珠菌的生长有抑制作用,同时聚乳酸膜的断裂伸长率提高近 64%。也有研究^[10]表明,负载 30% 百里香精油可使聚乳酸/瓜尔胶膜具有较好的表面疏水性,呈现良好的抑菌抗氧化活性。紫苏醛(Perillaldehyde, PAE)作为植物天然提取物之

一,是食药同源植物紫苏中主要成分,具有抗氧化和广谱抑菌作用,对革兰氏阳性和阴性菌具有同等抑菌效果^[11]。而对负载 PAE 的 PLA 膜表观性质及抑菌保鲜性能却未见报道。

研究拟以 PAE 为抗菌剂,基于静电纺丝技术,制备 PAE-PLA 抗菌保鲜包装膜,探究 PAE 负载量对薄膜性能的影响,并评估该薄膜对羊肉的保鲜效果,以期为生物基保鲜包装技术的发展提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷鲜羊肉:呼和浩特市玉泉区美通市场;
聚乳酸:生物级,上海麦克林生物有限公司;
二甲基亚砜:生物级,碧云天生物科技有限公司;
N,N-二甲基甲酰胺:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;
二氯甲烷:分析纯,德国赛默飞公司;
紫苏醛:生物级,上海源叶生物科技有限公司;
平板计数琼脂(PCA)培养基:北京路桥生物公司;
电子天平:JY5002 型,上海良平仪器仪表有限公司;
高压静电纺丝机:DFS-001 型,北京新凯伟科技有限公司;
扫描电子显微镜:EVO-LS10 型,德国卡尔蔡司公司;
电子万能试验机:LYD220S 型,上海铸金分析仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 静电纺丝液制备 将 3 g PLA 溶解于 20 mL N,N-二甲基甲酰胺—二氯甲烷混合液($V_{\text{N,N-二甲基甲酰胺}} : V_{\text{二氯甲烷}} = 3 : 7$)中,于 50 $^{\circ}\text{C}$ 加热 30 min 至聚乳酸完全溶解。分别添加 12.5, 25, 50, 100 μL 的 PAE,磁力搅拌 12 h,超声 30 min,形成 PAE-PLA 静电纺丝膜液,并依次标记为 PAE-12.5、PAE-25、PAE-50、PAE-100,不添加 PAE 为对照组。

1.2.2 PLA-PAE 膜制备 将装有 5 mL PLA-PAE 静电纺丝液的注射器固定于静电纺丝平台,安装 18 号钢针。在流速 0.005 mm/s、电压 20 kV、与接收器间距 10 cm、25 $^{\circ}\text{C}$ 和 50% 湿度环境条件下静电纺丝。

1.2.3 PLA-PAE 膜表观结构分析 采用 EVO-LS10 型扫描电子电镜观察 PLA-PAE 纳米纤维膜形貌结构,并采用 Image J 对图像进行分析。

1.2.4 X 射线衍射(XRD) 使用 Bruker D8 Advance X 射线衍射分析仪对负载不同量紫苏醛电纺膜进行分析。电压为 20 kV,电流 5 mA, $K\alpha(\lambda = 1.5418 \text{ \AA})$,扫描速率 4 ($^{\circ}$)/min,步长 0.02 $^{\circ}$,扫描范围 5 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$ 。

1.2.5 机械性能测试 经模具将 PLA-PAE 膜切割为 0.5 cm $\times$ 3 cm 样品,使用游标卡尺测定待测样品多个不

同位置厚度,基于平均厚度,经电子万能试验机分析 PLA-PAE 纳米纤维膜的抗拉强度和断裂伸长率。初始间隙距离 2.0 cm,测试速度 50 mm/min。

1.2.6 羊肉贮藏 在无菌环境中,去除羊肉表面的筋膜后,将肉样分别切成 30 g 的方块,然后使用 PAE-12.5、PAE-25、PAE-50、PAE-100 膜进行包装,以未包装的样品作为对照(Control)。将样品置于 4 °C 冰箱中贮藏 0,3,6,9,12 d,进行保鲜试验评价。

1.2.7 测定指标及方法

(1) pH:参照 GB 5009.273—2016。

(2) 色差:使用色差仪测定羊肉样品的亮度 L^* 值、红度 a^* 值和黄度 b^* 值。使用前,先用配套黑板和白板进行校正。每个样品选取 3 个不同位置进行测定后结果取平均值,以确保取样的均匀性。

(3) 菌落总数:参照 GB 4789.2—2016,并稍作改动。称取 5 g 肉样于含有 45 mL 0.95% 生理盐水的无菌锥形瓶中,于 4 °C 摇床上充分混匀,待测。将涂布好的平板置于 37 °C 恒温培养箱、培养 24 h 后计数菌落。

(4) 挥发性盐基氮(TVB-N)含量:参照 GB 5009.228—2016 中的微量扩散法,并稍微改动。称取 5 g 肉样加入装有 25 mL 蒸馏水离心管中不时振摇,试样在冰浴条件下均质 30 s,并浸渍 30 min 后过滤,滤液待测。

1.3 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 19.0 对试验数据进行统计和差异性分析,用平均值±标准差表示, $P<0.05$ 表示显著性差异。并用 Origin 18.5C 进行作图。

2 结果与分析

2.1 PAE-PLA 纳米纤维膜表现形态分析

由图 1 和表 1 可知,随着 PAE 负载量的增加,PAE-PLA 纳米纤维膜的直径呈先下降后上升再下降的变化趋势,纤维形貌逐渐规则化。PAE 负载量处于 0 ~ 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液时,PAE-PLA 纳米纤维膜的直径随负载量增加而先下降后增加,且均小于对照组的(123.91 nm),说明 PAE 的添加可能改变了聚乳酸生物大分子的粒径,进而对纤维直径产生明显的改变。相比负载 PAE 其他 3 组,PAE-50 组纳米纤维直径最大,为 114.65 nm,纳米纤维形态较好;PAE 负载量大于或小于 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液时,纳米纤维出现纳米纤维卷曲的现象。这可能是因为负载不同量的 PAE 对静电纺丝溶液的表面电荷密度产生影响,飞向收集器的纳米纤维会随着表面电荷密度的降低而合并,进而改变纤维直径^[12]。同时,随着 PAE 负载量的增加,纳米纤维分布由不规则逐渐变为形态良好、无断丝的状态;当 PAE 添加量达到 100 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液,纤维膜出现断丝和形成纳米颗粒的现象,说明 PLA 对 PAE 负载能力具有一限度。

2.2 PAE-PLA 纳米纤维膜稳定性分析

通过 XRD 探究了负载 PAE 的 PAE-PLA 纳米纤维膜的晶体结构。如图 2 所示,对照组、PLA-12.5、PLA-25、PLA-50、PLA-100 纳米纤维膜在 17°和 31°处都有两个宽的特征衍射峰,各组间峰强度差异不明显,且峰高低于峰

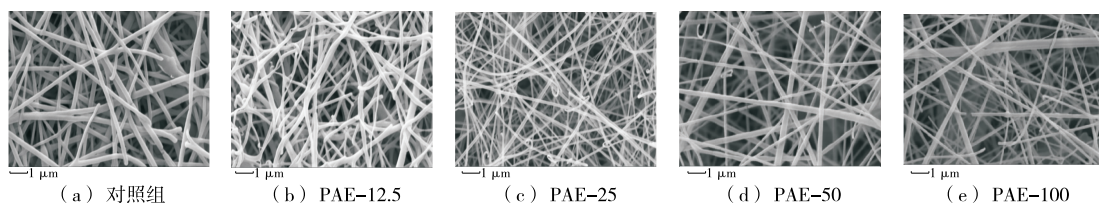


图 1 紫苏醛负载量对 PAE-PLA 纳米纤维膜表现结构的影响

Figure 1 Effects of perillaaldehyde loading on the apparent structure of PAE-PLA nanofiber films

表 1 紫苏醛负载量对 PAE-PLA 纳米纤维膜的纤维直径分布的影响

Table 1 Effects of perillaaldehyde loading on the diameter distribution of PAE-PLA nanofiber films

组别	纳米纤维直径/nm
对照组	137.91±41.97
PAE-12.5	107.16±41.71
PAE-25	91.41±25.33
PAE-50	114.65±31.99
PAE-100	91.43±31.89

宽,可能是由于静电纺丝过程中溶剂的快速蒸发阻碍了晶格的形成^[13];相似的峰位置也说明 PAE 的加入并未改变 PLA 原有晶体结构,也表明 PLA 与 PAE 具有良好的相容性,有助于改善 PLA 膜的稳定性。

2.3 PAE-PLA 纳米纤维膜机械性能分析

负载不同量 PAE 的 PAE-PLA 纳米纤维的机械性能如表 2 所示,随着 PAE 负载量增加,PAE-PLA 纳米纤维膜的延伸率和抗拉强度呈先增加后降低的变化趋势。PAE 负载量为 50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液时,纳米纤维膜延伸率和拉伸强度均达到最高,分别为 68.72% 和 1.82 MPa。表 2 表明,PAE-50 组膜延伸率比对照组和 PAE-100 组分别提高了 15.17% 和 12.32%,拉伸强度比

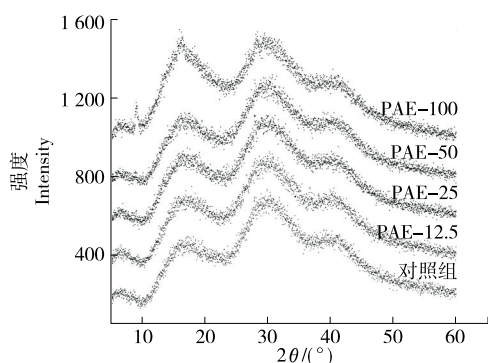


图 2 紫苏醛负载量对 PAE-PLA 纳米纤维膜稳定性的影响

Figure 2 Effects of loading concentrations of perillaldehyde on the stability of PAE-PLA nanofiber films

对照组、PAE-100 组分别提高了 24.13%, 25.00%。这可能是一定负载量 PAE 的加入改善了聚乳酸静电纺丝溶液均一性, 增加 PAE 与 PLA 分子间相互作用, 使得 PAE-PLA 膜网络结构变得愈加致密, 提高了膜的抗拉强度^[14]; 同时增加了高分子链的流动性, 改善复合膜的韧度, 提高膜的延伸率^[14-15]。因此, 适宜的 PAE 负载量是改善 PAE-PLA 膜机械特性的重要选择。

2.4 PAE-PLA 纳米纤维膜包装羊肉的保鲜效果

2.4.1 羊肉 pH 值的变化 由表 3 可知, 贮藏过程, 冷鲜羊肉 pH 值随 PAE 负载量的差异而呈不同变化趋势。随着贮藏时间的延长, 冷鲜羊肉在 6 d 后 pH 值递增速率增加, 说明此时微生物或内源酶对肉蛋白分解为氨和胺等碱性物质活性增加, 致使此时羊肉呈现出腐败的趋势。相比对照组, PAE 负载量为 0~50 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液时, 随 PAE 负载量的增加, pH 上升趋势减缓, 说明 PAE 负载量增加对腐败菌产生累积抑制作用。PAE 负载量为 100 $\mu\text{L}/20\text{ mL}$ 静电纺丝液时, 6 d 和 12 d 时 PAE-100 与 PAE-50 组 pH 值差异不明显。这可能是由于 PLA 对 PAE 的较弱的分子相互作用力, 致使多余 PAE 在静电纺丝过程呈游离态而被挥发, 降低了 PLA 膜的有效负载

表 2 紫苏醛负载量对 PAE-PLA 纳米纤维膜延伸率和抗拉强度的影响[†]

Table 2 Effects of different concentrations of perillaldehyde on the elongation and tensile strength of PAE-PLA nanofiber films

组别	延伸率/%	抗拉强度/MPa
对照组	59.67 $\pm$ 1.45 ^A	1.45 $\pm$ 0.12
PAE-12.5	62.25 $\pm$ 4.23 ^A	1.55 $\pm$ 0.16
PAE-25	65.28 $\pm$ 2.34 ^A	1.67 $\pm$ 0.10
PAE-50	68.72 $\pm$ 1.45 ^B	1.80 $\pm$ 0.20
PAE-100	58.12 $\pm$ 1.26 ^A	1.44 $\pm$ 0.20

[†] 同列大写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

率, 导致与 PAE-50 组呈现类似保鲜效果。贮藏 12 d 后, PAE-50 组 pH 值为组中最低, 为 6.50。相比表明, PAE-50 纳米纤维膜可有效延缓羊肉的腐败变质。

2.4.2 羊肉色泽的变化 由表 4 可知, 对照组和 PAE-50 组第 6 天的 L^* 值显著低于第 12 天的 ($P < 0.05$), PAE-12.5、PAE-25 组第 6 天的 L^* 值与第 12 天的差异不显著 ($P > 0.05$)。PAE-100 组第 12 天的 L^* 值显著低于第 6 天的, 第 12 天对对照组 L^* 值显著低于 PAE-50 组的, 显著高于 PAE-25 组和 PAE-100 组的 ($P < 0.05$), 与 PAE-12.5 组的 L^* 值相比差异不显著 ($P > 0.05$)。贮藏初期, 试验组和对照组 a^* 值的变化趋势大体一致。贮藏后期, PAE-50 组和 PAE-100 组的 a^* 值显著高于对照、PAE-12.5 和 PAE-25 组。贮藏期间, 试验组的 b^* 值变化差异不显著 ($P > 0.05$), 而对照组在贮藏后期 b^* 值变化差异显著 ($P < 0.05$)。相比 12 d 时对照组与试验组 a^* 和 b^* 值的变化, 可知 PAE-PLA 纳米纤维膜有助于延缓羊肉腐败、延长保鲜货架期。

2.4.3 羊肉菌落总数的变化 肉类腐败程度与微生物数量呈正相关, 当活菌数高于 $1 \times 10^6 \text{ lg}(\text{CFU/g})$, 表明其开始进入腐败期, 蛋白质、脂肪氧化变性伴随不良分解代谢产物的生成, 肉品劣变程度将逐渐加重。由表 5 可知, 活菌总数随贮藏时间延长而逐渐增加; 随着 PAE-PLA 纳米

表 3 PAE-PLA 纳米纤维膜对贮藏过程中冷鲜羊肉 pH 值的影响[†]

Table 3 Effects of PAE-PLA nanofiber films on pH value of chilled mutton during storage

贮藏时间/d	对照组	PAE-12.5	PAE-25	PAE-50	PAE-100
0	5.85 $\pm$ 0.02 ^a	5.85 $\pm$ 0.02 ^a	5.85 $\pm$ 0.02 ^a	5.85 $\pm$ 0.02 ^a	5.85 $\pm$ 0.02 ^a
3	6.14 $\pm$ 0.01 ^{Bb}	6.02 $\pm$ 0.00 ^{Bb}	6.05 $\pm$ 0.01 ^{Bb}	5.83 $\pm$ 0.01 ^{Aa}	6.03 $\pm$ 0.04 ^{Bb}
6	6.20 $\pm$ 0.01 ^{Cc}	6.14 $\pm$ 0.01 ^{Bc}	6.13 $\pm$ 0.00 ^{Bc}	6.00 $\pm$ 0.01 ^{Ab}	6.12 $\pm$ 0.00 ^{Bc}
9	6.45 $\pm$ 0.01 ^{Cd}	6.37 $\pm$ 0.00 ^{Bd}	6.30 $\pm$ 0.01 ^{Bd}	6.17 $\pm$ 0.01 ^{Ac}	6.34 $\pm$ 0.01 ^{Bc}
12	6.80 $\pm$ 0.04 ^{Ce}	6.65 $\pm$ 0.03 ^{Be}	6.65 $\pm$ 0.10 ^{Be}	6.50 $\pm$ 0.01 ^{Ad}	6.60 $\pm$ 0.05 ^{Bd}

[†] 同行大写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$); 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 PAE-PLA 纳米纤维膜对贮藏过程中冷鲜羊肉色泽的影响[†]

Table 4 Effects of PAE-PLA nanofiber films on the color of chilled mutton during storage

指标	贮藏时间/d	对照组	PAE-12.5	PAE-25	PAE-50	PAE-100
<i>L</i> *	0	41.80±0.66 ^a	41.80±0.66 ^a	41.80±0.66 ^a	41.80±0.66 ^a	41.80±0.66 ^b
	3	47.19±0.77 ^{Aa}	48.94±0.30 ^{Bb}	45.30±1.22 ^{Ab}	49.89±1.66 ^{Bb}	49.32±0.63 ^{Bc}
	6	49.39±0.56 ^{Ba}	49.85±1.52 ^{Bb}	46.76±1.33 ^{Ab}	51.87±0.06 ^{Ba}	50.69±1.59 ^{Bc}
	9	52.61±0.54 ^{Bb}	47.47±0.92 ^{Ab}	45.99±3.64 ^{Ab}	51.14±0.29 ^{Bb}	49.78±0.20 ^{Bc}
	12	50.59±1.27 ^{Cb}	48.47±0.68 ^{Cb}	45.14±1.02 ^{Bb}	56.57±0.79 ^{Dc}	35.57±2.24 ^{Aa}
<i>a</i> *	0	2.78±0.89	2.78±0.89 ^a	2.78±0.89	2.78±0.89	2.78±0.89 ^b
	3	1.33±0.14 ^A	1.51±0.10 ^{Aa}	2.76±0.36 ^B	1.33±0.66 ^C	1.52±0.46 ^{Ab}
	6	1.32±0.82 ^A	1.74±0.44 ^{Aa}	3.18±0.26 ^B	1.90±0.09 ^A	0.50±0.14 ^{Aa}
	9	1.65±0.79 ^A	3.02±0.59 ^{Ab}	2.27±0.26 ^A	1.92±0.17 ^B	1.72±0.12 ^{Ab}
	12	0.99±0.34	1.70±0.74 ^a	3.42±0.10	1.13±0.08	2.19±1.45 ^b
<i>b</i> *	0	8.95±0.31	8.95±0.31	8.95±0.31	8.95±0.31	8.95±0.31 ^a
	3	9.88±0.83 ^B	7.39±0.37 ^A	10.68±0.36 ^B	10.69±1.97 ^B	11.31±1.51 ^{Bb}
	6	10.22±1.75	8.28±0.53	7.87±0.12	10.47±1.40	11.59±0.76 ^b
	9	11.25±1.02 ^B	9.40±0.99 ^A	6.88±0.77 ^A	9.15±2.74 ^A	7.57±0.18 ^{Aa}
	12	12.58±2.08	9.32±0.5	8.18±3.02	12.40±0.73	10.42±0.61 ^b

† 同行大写字母不同表示差异显著($P<0.05$);同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

纤维膜中 PAE 负载量增加,试验组活菌数增加幅度逐渐减缓;相比其他组,PAE-50 组增加幅度较小。贮藏 6 d 后,对照组活菌总数达到 5.90 lg(CFU/g),接近肉制品新鲜度临界,且显著高于负载不同量 PAE 的 PAE-PLA 纳米纤维膜包装组($P<0.05$)。贮藏 12 d 后,PAE-12.5、PAE-25、PAE-50 组的活菌总数分别为 8.44, 7.29, 5.52 lg(CFU/g),说明 PAE 对肉中腐败菌产生累积抑制作用随 PAE 负载量增加而增加。而贮藏结束时 PAE-100 组羊肉中总菌数检出为 6.46 lg(CFU/g),高于 PAE-50 组,这进一步证实 PLA 对 PAE 有限的负载能力,导致多余 PAE 不能被较好束缚而造成挥发损失,致使 PAE-100 膜中 PAE 有效负载量可能低于 PAE-50。

同时也表明,PAE-50 纳米纤维膜将是一种有潜力的肉类保鲜包材。

2.4.4 羊肉 TVB-N 含量的变化 GB 2707—2016《食品安全国家标准 鲜(冻)畜禽产品》规定新鲜禽肉 TVB-N 含量不高于 15 mg/100 g。表 6 表明,羊肉中 TVB-N 含量随贮藏时间延长而逐渐增加,随着 PAE 负载含量的增加,羊肉中 TVB-N 含量增加幅度趋缓。贮藏 6 d 后,对照组达到 17.50 mg/100 g,PLA 纳米纤维膜包装的冷鲜羊肉 TVB-N 含量增加相对缓慢,PAE-12.5、PAE-25、PAE-50 及 PAE-100 4 组羊肉的 TVB-N 含量均未高于 10 mg/100 g。贮藏 12 d,PAE-50 组的 TVB-N 含量最低,为 12.55 mg/100 g。

表 5 PAE-PLA 纳米纤维膜对贮藏过程中冷鲜羊肉中活菌总数的影响[†]

Table 5 Effects of PAE-PLA nanofiber films on the total number of viable bacteria in chilled mutton during storage

贮藏时间/d	对照组	PAE-12.5	PAE-25	PAE-50	PAE-100
0	3.41±0.02 ^a	3.41±0.02 ^a	3.41±0.02 ^a	3.41±0.02 ^a	3.41±0.02 ^a
3	4.87±0.09 ^{Cb}	4.04±0.06 ^{Bb}	3.82±0.01 ^{Ab}	4.15±0.10 ^{Bb}	3.70±0.18 ^{Aa}
6	5.90±0.09 ^{Dc}	5.18±0.03 ^{Cc}	4.36±0.08 ^{Bc}	3.93±0.06 ^{Ac}	4.18±0.07 ^{Bb}
9	7.73±0.09 ^{Dd}	7.18±0.07 ^{Cd}	6.82±0.14 ^{Cd}	4.90±0.17 ^{Ad}	5.47±0.37 ^{Bc}
12	9.18±0.44 ^{Ee}	8.44±0.02 ^{De}	7.29±0.09 ^{Ce}	5.52±0.08 ^{Ae}	6.46±0.19 ^{Bd}

† 同行大写字母不同表示差异显著($P<0.05$);同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 6 PAE-PLA 纳米纤维膜对贮藏过程中冷鲜羊肉中 TVB-N 含量的影响[†]

Table 6 Effects of PAE-PLA nanofiber films on the TVB-N in chilled mutton during storage

mg/100 g

贮藏时间/d	对照组	PAE-12.5	PAE-25	PAE-50	PAE-100
0	5.32±0.21 ^a	5.32±0.21 ^a	5.32±0.21 ^a	5.32±0.21 ^a	5.32±0.21 ^a
3	12.74±1.02 ^{Cb}	8.90±0.35 ^{Bb}	7.67±0.39 ^{Ab}	6.57±0.83 ^{Ab}	7.20±0.30 ^{Ab}
6	17.50±0.67 ^{Bc}	9.51±0.71 ^{Ab}	9.00±0.97 ^{Ac}	8.46±0.81 ^{Abc}	8.65±0.30 ^{Ac}
9	26.18±0.88 ^{Bd}	12.27±0.50 ^{Ac}	11.86±2.94 ^{Ac}	10.28±1.02 ^{Ac}	13.32±0.36 ^{Ad}
12	38.52±1.71 ^{De}	16.66±1.11 ^{Bd}	16.46±0.13 ^{Bd}	12.55±0.20 ^{Ad}	18.87±0.35 ^{Ce}

[†] 同行大写字母不同表示差异显著($P<0.05$);同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

3 结论

通过静电纺丝技术制备负载紫苏醛的聚乳酸纳米纤维包装膜,基于扫描电子显微镜、X 射线衍射、机械性能表征及保鲜试验评价,紫苏醛与聚乳酸通过氢键等分子间作用,改善了聚乳酸纳米纤维丝状态和稳定性,负载紫苏醛的聚乳酸纳米纤维膜呈现良好的纤维排布和空间网络结构,进而提高聚乳酸膜的机械特性。聚乳酸对紫苏醛呈现一定载荷,适宜负载量有助于展现聚乳酸膜的保鲜特性。

参考文献

[1] 章彬. 冷鲜鸡加工及贮藏过程中的微生物调查及气调保鲜技术应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017: 54.

ZHANG B. Investigation of microorganisms in processing and storage of chilled chicken and application of air conditioning preservation technology[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017: 54.

[2] 姚倩儒, 陈历水, 李慧, 等. 冷鲜肉保鲜包装技术现状和发展趋势[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 194-200.

YAO Q R, CHEN L S, LI H, et al. Current situation and development trend of packaging technology of chilled fresh meat[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 194-200.

[3] MISHRA D, KHARE P, SINGH D K, et al. Retention of antibacterial and antioxidant properties of lemongrass oil loaded on cellulose nanofibre-poly ethylene glycol composite [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 114: 68-80.

[4] OTONI C G, AVENA-BUSTILLOS R J, AZEREDO H M C, et al. Recent advances on edible films based on fruits and vegetables-A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(5): 1 151-1 169.

[5] YANG Y, LIU H, WU M, et al. Bio-based antimicrobial packaging from sugarcane bagasse nanocellulose/nisin hybrid films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 627-635.

[6] KARIM M, FATHI M, SOLEIMANIAN-ZAD S. Nanoencapsulation of cinnamic aldehyde using zein nanofibers by novel needle-less electrospinning: Production, characterization and their application to reduce nitrite in sausages[J]. Journal of Food Engineering, 2020,

288: 110140.

[7] FABRA M J, LÓPEZ-RUBIO A, LAGARON J M. Use of the electrohydrodynamic process to develop active/bioactive bilayer films for food packaging applications[J]. Food Hydrocoll, 2016, 55: 11-18.

[8] IMANI F, KARIMI-SOFLOU R, SHABANI I, et al. PLA electrospun nanofibers modified with polypyrrole-grafted gelatin as bioactive electroconductive scaffold[J]. Polymer, 2021, 218: 123487.

[9] ARDJOUN N, CHIBANI N, SHANKAR S, et al. Development of antimicrobial films based on poly (lactic acid) incorporated with thymus vulgaris essential oil and ethanolic extract of mediterranean propolis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 535-542.

[10] MAROUF L Y, GHORBANI M, MOHAMMADI M, et al. Improvement of the physico-mechanical properties of antibacterial electrospun poly lactic acid nanofibers by incorporation of guar gum and thyme essential oil [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 622: 126659.

[11] ZHOU Q, HU Z, DU L, et al. Inhibition of enterococcus faecalis growth and cell membrane integrity by perilla frutescens essential oil[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2020, 17(9): 547-554.

[12] SHARMA R, GHOSHAL G. Emerging trends in food packaging [J]. Nutrition & Food Science, 2018, 48(5): 764-779.

[13] WANG D B, SUN Z L, SUN J Y, et al. Preparation and characterization of polylactic acid nanofiber films loading Perilla essential oil for antibacterial packaging of chilled chicken [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 379-388.

[14] 张霖雲. 肉桂醛微胶囊聚乳酸抗菌薄膜的制备及其对番木瓜的保鲜应用[D]. 南宁: 广西大学, 2020: 41-42.

ZHANG L Y. Preparation of cinnamic aldehyde microcapsule polylactic acid film and its application to the preservation of papaya[D]. Nanning: Guangxi University, 2020: 41-42.

[15] 关曼. 壳聚糖/大豆分离蛋白复合膜的制备、性能及应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 32-37.

GUAN M. Preparation, properties and application of Chitosan/ Soybean protein isolate composite membranes [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 32-37.