

改性水滑石/聚乙烯复合抗菌薄膜对菜心保鲜效果的影响

张屹钧¹, 刘彦谷¹, 刘源^{1*}, 魏星², 赵文声², 赵文林²

(1.广东工业大学 轻工化工学院, 广州 510006; 2.呈和科技股份有限公司, 广州 510445)

摘要: **目的** 探究自制改性水滑石复合抗菌薄膜对菜心的保鲜效果。**方法** 将5-甲酰基水杨酸插层的水滑石(FSA-LDHs)添加到线性低密度聚乙烯中,通过挤出流延工艺制备FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜,并进行菜心保鲜实验。将菜心分为FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜组、纯聚乙烯(PE)薄膜组、无包装组,在(4±1)℃条件下储存11 d,定期取出菜心样品进行品质指标表征,通过对比菜心相关品质指标评价其保鲜效果。**结果** 自制FSA-LDHs复合抗菌薄膜的结晶性提高,比纯PE薄膜的氧气透过率降低了81.2%,水蒸气透过率降低了46.9%,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌能力分别提升了29.6%和22.7%。有效降低了氧气和水蒸气透过率,提升了薄膜抗菌能力。在保鲜实验上,其抑制了质量损失率、丙二醛积累和过氧化物酶活性的增加,并减缓了茎部硬度、叶绿素、类胡萝卜素、维生素C、总酚和类黄酮含量的下降。FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜的保鲜效果优于纯PE薄膜组及无包装组。**结论** FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜较纯PE薄膜对菜心有更好的保鲜效果,能够将其保质期延长3~5 d,可替代纯PE薄膜用于果蔬保鲜。

关键词: 改性水滑石; 聚乙烯薄膜; 菜心; 贮存; 保鲜

中图分类号: TB484.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)13-0175-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.020

Effect of Modified Hydrotalcite/Polyethylene Composite Antimicrobial Films on the Preservation of Chinese Flowering Cabbage

ZHANG Yijun¹, LIU Yangu¹, LIU Yuan^{1*}, WEI Xing², ZHAO Wensheng², ZHAO Wenlin²

(1. College of Light Industry and Chemical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. GCH Technology Co., Ltd., Guangzhou 510445, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of self-made modified hydrotalcite antibacterial composite films on the preservation of Chinese flowering cabbage. 5-formylsalicylic acid intercalated hydrotalcites (FSA-LDHs) were added to linear low-density polyethylene. FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films were prepared through the extrusion casting process and were tested for the preservation effect on Chinese flowering cabbage. Chinese flowering cabbage was put under FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films group, pure polyethylene (PE) films group, and no-packaging group and stored at (4±1) °C for 11 days. The Chinese flowering cabbage was periodically taken out for the characterization of quality indexes, and the preservation effect was evaluated by comparing the relevant quality indexes. The self-made FSA-LDHs composite antimicrobial films showed improved crystallinity, with oxygen permeability decreasing by 81.2% and water vapor permeability decreasing by 46.9% compared to the pure PE films. The antibacterial ability against *Escherichia coli* and

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 企业委托科技项目(23HK0531, 21HK0340)

*通信作者

Staphylococcus aureus increased by 29.6% and 22.7%, respectively. This effectively reduced the transmission rate of oxygen and water vapor, and improved the antibacterial ability of the films. In the preservation experiment, it inhibited the increase of weight loss rate, malondialdehyde accumulation and peroxidase activity, and slowed down the decline of stem hardness, chlorophyll, carotenoids, vitamin C, total phenols and flavonoids. The preservation effect of FSA-LDHs/PE composite antibacterial films was better than that of the pure PE films group and the no-packaging group. Compared with pure PE films, the FSA-LDHs/PE composite antibacterial films has a better preservation effect on Chinese flowering cabbage, extending the shelf life by 3-5 days and can replace pure PE films for fruit and vegetable preservation.

KEY WORDS: modified hydrotalcite; polyethylene films; Chinese flowering cabbage; storage; preservation

在食品保鲜领域,保鲜膜不仅扮演着保障食品安全的重要角色,目前通过功能薄膜创新延长食品的保鲜期,同时最大限度地保留其营养价值^[1-2]。为了满足不同食品的保鲜需求,研究人员开展了保鲜技术及保鲜薄膜的研究,以延长新鲜果蔬的保质期并降低食品安全风险^[3]。有研究表明,通过向聚合物中添加纳米材料可以提高力学性能、隔热性能和阻隔性能,纳米颗粒与线性低密度聚乙烯(Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)分子的相互作用有助于提升聚乙烯(PE)薄膜的结晶度^[4]。范鑫等^[5]采用静电纺丝技术制备的玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜,有效减缓香蕉表皮的褐变,延缓果皮和果肉硬度的下降,延长香蕉货架期和提升贮藏品质。陈顺心等^[6]通过流延成膜法制备的海藻酸钠-壳聚糖-茶末复合膜,具有良好的抗氧化和抗菌性能。能有效降低室温下葡萄的腐烂率,抑制维生素C(Vitamin C, VC)含量的下降,延缓可溶性固形物含量的上升,并有效抑制多酚氧化酶活性,从而延缓果实衰老。黄若男等^[7]使用聚乙烯醇作为基材,添加VC作为抗氧化剂,制备出了VC质量分数为0.10%的聚乙烯醇/VC保鲜膜。该保鲜膜展现出良好的透氧性、透湿性、抗氧化能力,并对白玉菇有显著的保鲜效果。

菜心作为一种广受欢迎的绿色蔬菜,不但以其清脆的口感和淡雅的香气征服了无数食客的味蕾,而且以其丰富的营养价值和健康益处赢得了营养学家的推崇。然而,这种蔬菜在采摘后,如果保鲜不当,容易失去新鲜度,会导致营养成分流失和风味降低^[8]。因此,研究和应用有效的保鲜技术对保持菜心的新鲜度、颜色、质地和营养价值具有重要意义^[9]。

本文根据层状双氢氧化物(Layered Double Hydroxide, LDH)与层间阴离子具有协同效应这一特点^[10-11],使用的类水滑石(LDHs)具有生物相容性好、安全、易降解等优点。5-甲酰基水杨酸(5-Formylsalicylic Acid, FSA)作为广谱抗菌剂,其安全、耐受性良好,且水杨酸及其衍生物普遍存在于药物和天然产物中。本研究将5-甲酰基水杨酸插层水滑石(FSA-LDHs)改性后添加到线性低密度聚乙烯中,利用共混流延法制备出FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜,通过与无包装及纯PE薄膜包装作对比,对

菜心的品质指标进行表征,探讨FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜对菜心贮存期及品质的影响,旨在为FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜在蔬菜保鲜领域的应用提供依据。

1 实验

1.1 原料与仪器

主要原料:5-甲酰基水杨酸插层锌铝水滑石(FSA-LDHs),实验室自制;硬脂酸(分析纯),采自上海麦克林生化科技有限公司;LLDPE(牌号7042),产地茂名石化;去离子水,自制;从超市购买空运来的新鲜宁夏菜心,挑选大小均一、无碰撞和机械损伤的菜心。

主要仪器:紫外可见分光光度计(ShimadzuUV-2700,岛津,日本);吹膜流延一体机(XH-432-430-25,锡华,中国);气体透过量测试仪(GTR-G1,众测,中国);水蒸气透过率测试仪(W401,标际,中国);X射线衍射仪(MiniFlex600, Rigaku,日本)。

1.2 样品的制备

1.2.1 FSA-LDHs的改性

将质量分数为1%的硬脂酸加入三口烧瓶,加入去离子水,溶解后,加入FSA-LDHs水滑石粉体,进行改性处理,对改性后的粉体进行抽滤洗涤,粉体在100℃下干燥24h,研磨成粉,得到了改性后的FSA-LDHs样品。

1.2.2 复合抗菌薄膜制备

称量适量改性后的FSA-LDHs和LLDPE,通过流延成型工艺,制备出FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜。复合抗菌薄膜厚度为(0.05±0.01)mm。

1.3 材料测试

1.3.1 XRD测试

通过X射线衍射仪对薄膜样本的晶格构造加以研究,其检测角度介于3°~70°。

1.3.2 氧气透过率测试

使用差压式气体渗透计, 依据 GB/T 1038.1—2022《塑料制品薄膜和薄片气体透过性试验方法第 1 部分: 差压法》, 检测 3 次, 最后计算出平均氧气透过率。

1.3.3 水蒸气透过率测试

使用水蒸气透过率测试仪, 依据 GB/T 26253—2010《塑料薄膜和薄片水蒸气透过率的测定红外检测器法》, 检测 3 次, 最后计算出平均水蒸气透过率。

1.3.4 抗菌活性测试

本研究选用大肠杆菌和金黄色葡萄球菌作为实验菌种, 这些菌株均由广州市微生物研究所提供, 并符合国际标准。为了评估提取物的抗菌效果, 遵循 GB/T 31402—2015《塑料 塑料表面抗菌性能试验方法》, 并计算复合抗菌薄膜抗菌性能值和抗菌率。

1.4 菜心保鲜实验

设有无包装组、纯 PE 薄膜组、FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组。菜心随机分为 3 组, 每组包含 5 个小组, 每小组有 2 个平行样品, 每个样品质量约为 (100±5) g, 使用热封机确保包装袋密封完好, 在温度为 (4±1) °C、相对湿度为 (40±5) %冰箱中储存, 并进行保鲜实验。保鲜周期为 11 d, 每隔 2 d 从每种类别中随机抽取 1 小组进行品质测试及观察外观形貌, 并采用 SPSS 软件进行方差分析。

1.4.1 硬度测定

使用 LX-101-1 硬度计, 从样品组中随机抽取 3 个菜心, 并在它们茎部的不同位置进行测量, 以确定其茎部的平均硬度^[12]。

1.4.2 质量损失率

通过称量法来测量每袋菜心的质量, 其中每袋的质量在贮藏前为 (100±5) g, 而在贮藏完成后, 应当按照式 (1) 来计算出其质量损失率^[12]。

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$
 (1)

式中: m_1 为菜心贮藏前的质量, g; m_2 为菜心贮藏后的质量, g。

1.4.3 丙二醛含量测定

参考孟敌等^[13]的硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量。

1.4.4 叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量测定

参考胡秉芬等^[14]的分光光度法测定叶绿素含量类胡萝卜素含量。

1.4.5 POD 酶活性测定

参考杨松等^[15]的愈创木酚法测定 POD 酶的活性。

1.4.6 VC 含量测定

参考 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中 2, 6-二氯靛酚滴定法^[13]测定 VC 含量。

1.4.7 总酚及类黄酮含量测定

参考《果蔬采后生理生化实验指导》的方法计测定总酚和类黄酮含量^[16]。

1.4.8 感官测定

按照表 1 中的菜心的感官评价标准^[17]: 茎叶新鲜度、表面色泽度、干缩程度、气味。评价者将根据个人的感官体验对菜心的这些方面进行打分, 并将各项得分累加得到总的感官评价分数。设定 80 分以上具有商业价值。

表 1 菜心的感官评价标准
Tab.1 Sensory evaluation criteria for Chinese flowering cabbage

评价标准	1 级		2 级		3 级		4 级		5 级	
	得分	标准	得分	标准	得分	标准	得分	标准	得分	标准
茎叶新鲜度	23~25	叶片饱满, 茎部坚实	20~<23	叶片饱满, 茎部相对坚实	17~<20	叶片饱满度一般, 茎部相对较软	14~<17	叶片饱满度较差, 茎部较软	0~<14	叶片饱满度极差, 茎部非常软
表面色泽度	23~25	叶片鲜亮, 颜色均匀	20~<23	叶片颜色鲜亮, 存在少量的黄化	17~<20	叶片颜色较暗, 存在明显的黄化	14~<17	叶片颜色暗淡, 存在大量的黄化	0~<14	叶片颜色暗, 存在严重的黄化
干缩程度	23~25	叶片和茎部保持原有形状	20~<23	叶片和茎部略微缩小	17~<20	叶片和茎部明显缩小	14~<17	叶片和茎部严重缩小	0~<14	叶片和茎部失去原有的形状
气味	23~25	自然清香, 无异味	20~<23	自然清香, 有轻微异味	17~<20	异味明显	14~<17	异味严重	0~<14	异味非常明显

2 结果与分析

2.1 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜分析

2.1.1 XRD 分析

XRD 图谱(图 1)显示, FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜比纯 PE 薄膜在晶体结构上增加 2 个衍射峰。纯 PE 薄膜在 2θ 分别为 21.6° 、 23.8° 和 36.4° 处是聚乙烯特征的衍射峰, 而 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜在 2θ 为 14.2° 和 17.1° 出现了新的衍射峰, 这证实了 FSA-LDHs 在制膜过程中已成功地与聚乙烯基质结合, 形成了复合结构^[10]。这是因为 FSA-LDHs 作为成核剂, 不仅促进了聚乙烯的结晶过程, 还加快了结晶速率, 形成了更多、更细小的结晶区域。

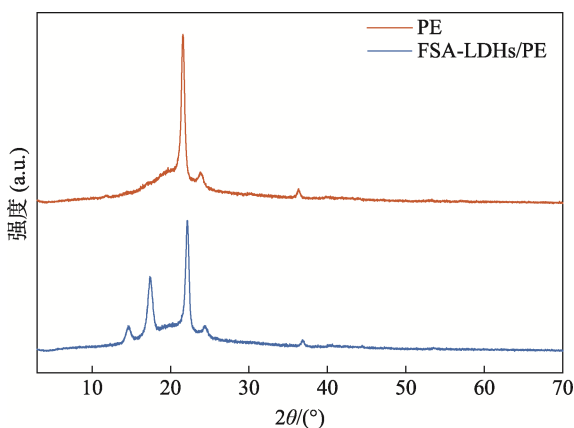


图 1 PE 薄膜和 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of PE films and FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films

2.1.2 氧气透过率和水蒸气透过率分析

从图 2 中可发现, FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜的氧气透过率相较于纯 PE 薄膜大幅降低了 81.2%, 水蒸气透过率也降低了 46.9%, 可见添加质量分数为 3% 的 FSA-LDHs 的 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜氧气和水蒸气阻隔性能得到提升。这是因为 FSA-LDHs 作为成核剂, 提高了薄膜的结晶性, 其加入为气体和水分子在薄膜中的穿透提供了更多的曲折路径, 这种“曲折路径效应”增加了气体分子和水分子穿透薄膜的难度, 从而降低了 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜对氧气和水蒸气的透过率^[18]。

2.1.3 抗菌活性分析

FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜的抗菌性能相关测试结果见表 2。由表 2 可知, 与纯 PE 薄膜相比, FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜对大肠杆菌的抗菌能力提升了 29.6%, 抗菌率达到 68.8%, 对金黄色葡萄球菌的抗菌能力提高了 22.7%, 抗菌率达到 91.4%。其

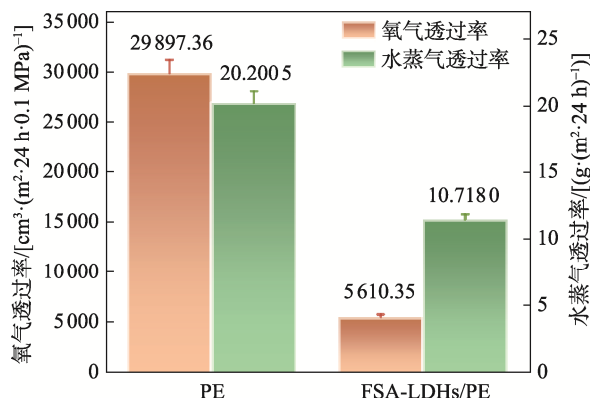


图 2 PE 薄膜和 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜的氧气透过率和水蒸气透过率

Fig.2 Oxygen permeability and water vapor permeability of PE films and FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films

中, 复合抗菌薄膜对金黄色葡萄球菌抗菌率提升显著。可见 5-甲酰基水杨酸插层水滑石使得 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜提升了抗菌特性。

2.2 保鲜实验分析

2.2.1 硬度

茎的硬度是评估蔬菜新鲜度的关键指标, 其变化受到多种因素的影响。如图 3a 所示, 所有贮藏条件下的菜心硬度均随时间延长而有所下降, 但下降速度存在显著差异, 无包装组的硬度下降速度最快, 快于纯 PE 薄膜组, 而 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜包装的菜心的硬度下降速度最慢, 在 11 d 时硬度仍保持在 47 HC ($P < 0.05$)。

2.2.2 质量损失率

质量损失率直接影响蔬菜的口感和新鲜程度。菜心中含有大量水分, 在贮藏期间容易因自身的蒸腾作用导致质量损失率增加, 降低其经济价值。如图 3b 所示, 无包装的菜心在贮藏 11 d 中质量损失率最大, 水分流失严重。在第 11 天时, 纯 PE 薄膜包装的菜心质量损失率显著降低至 3.6% ($P < 0.05$)。FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜包装的菜心质量损失率最低, 仅为 1.6% ($P < 0.05$)。

2.2.3 丙二醛含量

丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 是植物细胞中脂肪酸发生过度氧化时产生的一种物质, 用作衡量脂质过氧化水平的关键生物标志物。通过测定 MDA 的含量, 来评估植物细胞遭受氧化性损伤的严重程度。从图 4a 可见, 菜心细胞因氧化应激而导致 MDA 含量随时间的增加而逐渐上升, 其增长速度有显著差异, 从大到小排序为无包装组、纯 PE 薄膜组、FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组。在第 11 天时, 与纯

表 2 PE 薄膜和 FSA-LDHs/PE 复合抗菌对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌数据
Tab.2 Antibacterial data of PE films and FSA-LDHs/PE composite antibacterial films on
Escherichia coli and Staphylococcus aureus

样品	试验菌种	0 h 空白对照样 菌落数均值/ (10 ⁴ CFU·cm ⁻²)	接触后空白对照样 菌落数均值/ (10 ⁵ CFU·cm ⁻²)	接触后试验样 菌落数均值/ (10 ⁵ CFU·cm ⁻²)	抗菌率/%	抗菌性能值
PE	大肠杆菌	1.5	32	15	53.1	0.3
	金黄色葡萄球菌	1.6	5.1	1.3	74.5	0.6
FSA-LDHs/PE	大肠杆菌	1.5	32	10	68.8	0.5
	金黄色葡萄球菌	1.6	5.1	0.44	91.4	1.1

PE 薄膜包装组相比, FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜包装的菜心 MDA 的累积量为 6.4 μmol/mg, 减少了 35.3% ($P<0.05$)。

2.2.4 叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量

菜心中含有丰富的叶绿素, 其含量的减少是导致叶片由绿转黄并衰老的主要原因。如图 4b~d 所示, 3 组菜心的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量随着贮存时间的延长, 都呈下降趋势, 但下降速度有明显差异。

在贮藏前 5 d, 3 组菜心的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量变化相对平缓, 从第 7 天到第 11 天有显著差异。其中无包装组下降最快, 纯 PE 薄膜组次之, FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组下降最缓慢 ($P<0.05$)。

类胡萝卜素也是一种植物中的抗氧化物质, 其含量变化也可以反映出菜心受氧化损伤的程度。在贮藏期间, 3 组菜心的类胡萝卜素含量均呈下降趋势, 其中无包装组和纯 PE 薄膜组类胡萝卜素含量下降较快, 而 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组类胡萝卜素含量下降最慢 ($P<0.05$)。

2.2.5 POD 酶活性

过氧化物酶 (Peroxidase, POD 酶) 是一种关键的抗氧化酶, 它可以帮助细胞抵抗过氧化氢 (H₂O₂) 的侵害, 从而维持菜心的新鲜度^[19]。从图 4e 可以观察到, 3 组菜心的 POD 酶活性均呈上升的趋势, 但增长速度不同, FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组菜心的 POD 酶活性从 36.7 U/g 增加至 81.2 U/g, 其平均值比纯 PE 薄膜组的低了 37.6 U/g ($P<0.05$), 增长最为缓慢。

2.2.6 VC 含量

VC 被认为是植物抗氧化的重要成分, 越新鲜的菜心拥有越高的 VC 含量。从图 4f 中可发现, 随着贮藏时间的延长, 菜心中的 VC 含量不断下降。无包装组的 VC 含量下降最为迅速, 在第 3 天, VC 的损

失率就高达 55.6%; 第 7 天时, 纯 PE 薄膜组的 VC 含量下降到 17.6 mg/100 g。FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组的 VC 含量仍维持在较高水平, 为 24.6 mg/100 g ($P<0.05$), 有效维持了菜心的营养价值。

2.2.7 总酚和类黄酮含量

总酚与类黄酮作为植物细胞内重要的次生代谢产物, 它们的含量波动直接关系到植物细胞的抗氧化能力。如图 4g~h 所示, 无包装组和纯 PE 薄膜组菜心的总酚含量都呈先下降后上升趋势, 其中无包装组的总酚含量变化范围最大, 而 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组的菜心总酚含量从同一初始值缓慢降低至第 11 天的 38.2 OD_{280nm}/g ($P<0.05$)。

类黄酮含量的变化趋势与总酚相似, 无包装组和纯 PE 薄膜组的类黄酮含量也呈先下降后上升的趋势。FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组菜心的类黄酮含量则持续缓慢下降, 从初始值降至第 11 天的 48.9 OD_{325nm}/g ($P<0.05$)。

2.2.8 感官评价及形貌变化

感官品质是衡量蔬菜商业价值的重要指标, 反映蔬菜的口味、香气、外观等多方面的特性。根据表 1 菜心的感官评价标准, 实验结果见图 5, 菜心的感官评价分值均逐渐减少, 其中无包装组下降速度最大, 而纯 PE 薄膜组和 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组的下降速度则相对较慢 ($P<0.05$)。

贮存期间的形貌变化如表 3 所示, 随着贮存时间的延长, 变质情况日益严重, 无包装的样品在第 5 天已明显干缩, 叶片颜色变深, 失去商业价值。纯 PE 薄膜组菜心在第 5 天时叶片开始干缩, 第 9 天时叶片出现少许黄化, 而 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜组菜心在第 5 天仍无明显变化, 到第 11 天还保持良好色泽, 未出现干缩和腐败现象, 较纯 PE 薄膜的保鲜效果延长了 5 d。这说明 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜能明显改善菜心贮存过程中的感官品质。

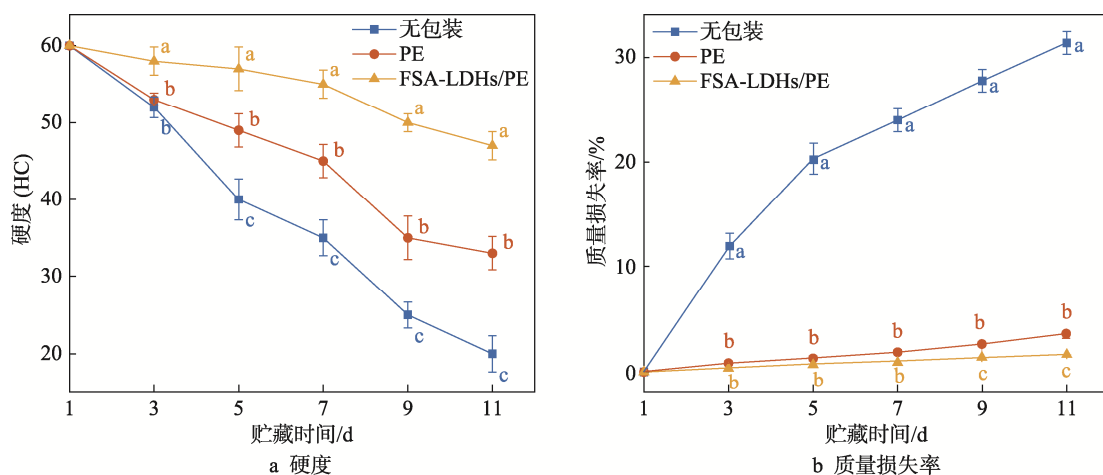


图3 FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜对菜心茎的硬度和质量损失率的作用结果
Fig.3 Effect of FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films on the hardness and weight loss of Chinese flowering cabbage stems

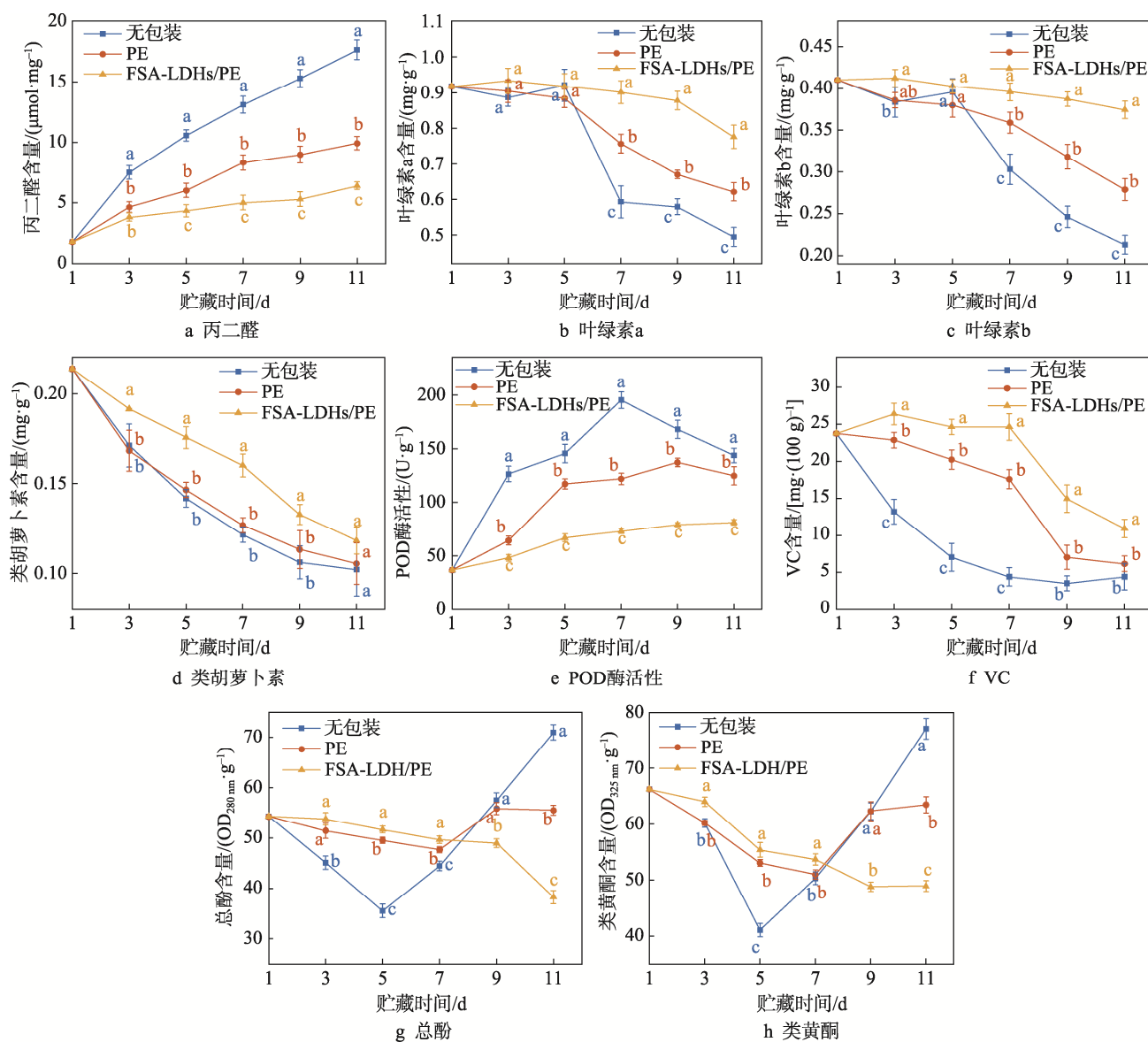


图4 FSA-LDHs/PE复合抗菌薄膜对相关品质指标的作用结果
Fig.4 Effect of FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films on related quality indexes of Chinese flowering cabbage

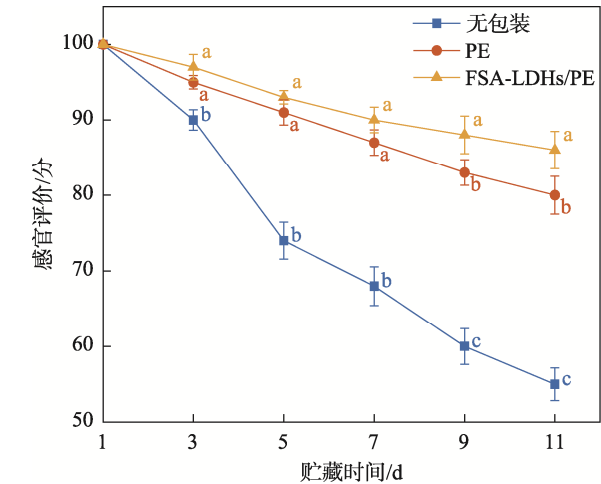


图 5 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜对菜心感官评价的作用结果
Fig.5 Effect of FSA-LDHs/PE composite antimicrobial films on sensory evaluation of Chinese flowering cabbage

2.3 结果与讨论

FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜具有独特的抗菌和阻隔性能,其氧气透过率相较于纯 PE 薄膜的大幅降低了 81.2%,更低的氧气透过率有助于维持包装内部的低氧环境,减少细胞氧化应激和因氧化导致的细胞损伤,抑制 MDA 积累和 POD 酶活性上升;有效减缓了乙烯的产生速率^[20],进而降低了叶绿素和类胡萝卜素的降解速度;同时也抑制了细胞呼吸代谢,减少了总酚和类黄酮的消耗,有助于延长总酚和类黄酮的稳定期;减少氧化作用对 VC 的破坏,有助于保持菜心的色泽和营养价值。

菜心质量损失率下降,未出现腐败现象,这是因为 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜较纯 PE 薄膜水蒸气透过率降低了 46.9%,阻隔性能有显著提升,有效减缓了菜心在贮存期间的蒸腾作用,减少了水分的蒸发,从而更有效地减少了菜心水分流失。同时该薄膜

表 3 贮藏期间形态变化
Tab.3 Morphological changes during storage

组别	1 d	3 d	5 d	7 d	9 d	11 d
无包装						
PE						
FSA-LDHs/PE						

的抗菌特性抑制了包装袋内细菌的生长,减缓了微生物对菜心的伤害,抑制了腐败现象,进一步延长了菜心的保鲜期。

3 结语

通过添加自制的 FSA-LDHs 抗菌材料到 LLDPE 中,开发出了一种新型的 FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜,将其用于新鲜菜心的低温贮存保鲜实验,并对其保鲜效果进行评价。实验结果表明:

1) FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜不仅具有较高的结晶性能,还具有良好的阻隔性能和抗菌性能。相较于纯 PE 薄膜,其氧气透过率降低了 81.2%,水蒸气透过率降低 46.9%,对大肠杆菌的抗菌能力提升了 29.6%,抗菌率提升至 68.8%,对金黄色葡萄球菌的抗菌能力提高了 22.7%,抗菌率提升至 91.4%。

2) FSA-LDHs/PE 复合抗菌薄膜的保鲜效果优于纯 PE 薄膜组及无包装组,在保鲜期间有效保持了菜

心的品质和营养价值,能够将菜心的保质期较纯 PE 薄膜延长 3~5 d。研究证明,该复合抗菌薄膜不仅可替代纯 PE 薄膜用于果蔬保鲜,还也为果蔬保鲜提供一种安全有效的应用方案。

参考文献:

[1] TIAN F, DECKER E A, GODDARD J M. Controlling Lipid Oxidation of Food by Active Packaging Technologies[J]. Food & Function, 2013, 4(5): 669-680.

[2] 刘博强, 郝义, 胡文清, 等. 水杨酸/LDPE 薄膜的制备及其对香蕉品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 75-82.

LIU B Q, HAO Y, HU W Q, et al. Preparation of Salicylic Acid/LDPE Film and Its Effect on Banana Quality[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 75-82.

[3] 卢亚男, 赵美艳, 李立. 聚乙烯抗菌膜的制备及其对

- 草莓保鲜效果的研究[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 195-202.
- LU Y N, ZHAO M Y, LI L. Preparation of Antibacterial Polyethylene Films and Their Effect on Strawberry Preservation[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(1): 195-202.
- [4] BUSU W N W, YUSOF M J M, BAKAR M S A, et al. Enhanced Tensile and Barrier Properties of Modified LLDPE with Rubbery Materials and Graphene Nanoplatelets for Packaging Application[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(18): 53810.
- [5] 范鑫, 杨婷, 王艺瑜, 等. 静电纺丝玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜的制备及应用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(5): 1-7.
- FAN X, YANG T, WANG Y Y, et al. Preparation and Application of Electrospun Zein-Cinnamaldehyde Fruit Preservation Film[J]. Food Research and Development, 2024, 45(5): 1-7.
- [6] 陈顺心, 刘海波, 朱静, 等. 海藻酸钠-壳聚糖-茶末复合膜的制备及其对葡萄的保鲜效果[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(2): 145-153.
- CHEN S X, LIU H B, ZHU J, et al. Preparation and Preservation Effect of Sodium Alginate-Chitosan-Tea Powder Composite Membrane and on Grapes[J]. Food Research and Development, 2024, 45(2): 145-153.
- [7] 黄若男, 刘陈梦, 吕俊阁, 等. 聚乙烯醇/维生素 C 复合保鲜膜制备及其对白玉菇品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 99-106.
- HUANG R N, LIU C M, LYU J G, et al. Preparation of Polyvinyl Alcohol/Vitamin C Composite Films and Its Effect on Quality of White Hypsizygus Marmoreus[J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 99-106.
- [8] 王萍, 王玲, 于新, 等. 菜心采后贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(19): 6956-6962.
- WANG P, WANG L, YU X, et al. Research Advances in Postharvest Storage and Preservation Techniques of Chinese Flowering Cabbage[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(19): 6956-6962.
- [9] 赵洁, 梁水连, 刘雯雯, 等. 不同保鲜包装方式对菜心品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 343-351.
- ZHAO J, LIANG S L, LIU W W, et al. Effects of Different Packaging Methods for Preservation on the Quality of Chinese Flowering Cabbages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 343-351.
- [10] BUGATTI V, CEFOLA M, MONTEMURRO N, et al. Combined Effect of Active Packaging of Polyethylene Filled with a Nano-Carrier of Salicylate and Modified Atmosphere to Improve the Shelf Life of Fresh Blueberries[J]. Nanomaterials, 2020, 10(12): 2513.
- [11] AZEVEDO A G, BARROS C, MIRANDA S, et al. Active Flexible Films for Food Packaging: A Review[J]. Polymers, 2022, 14(12): 2442.
- [12] 巫梅婷, 王玲, 刘海, 等. 不同自发气调包装袋对菜心茎木质化的影响[J]. 南方农业学报, 2023, 54(10): 3010-3019.
- WU M T, WANG L, LIU H, et al. Effects of Different Spontaneous Modified Atmosphere Packaging Bags on Lignification of Bolting Stem of Chinese Flowering Cabbage[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(10): 3010-3019.
- [13] 孟敌, 焦贺, 赵安琪, 等. 真空预冷对采后娃娃菜流通及货架品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 296-308.
- MENG D, JIAO H, ZHAO A Q, et al. Effect of Vacuum Pre-cooling on the Circulation and Shelf Quality of Postharvest Baby Cabbage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 296-308.
- [14] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 等. 分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J]. 草业科学, 2018, 35(8): 1965-1974.
- HU B F, HUANG H L, JI Y Z, et al. Evaluation of the Optimum Concentration of Chlorophyll Extract for Determination of Chlorophyll Content by Spectrophotometry[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(8): 1965-1974.
- [15] 杨松, 朱倩, 王灼琛, 等. 1-MCP 结合 PE 包装处理对带壳茭白贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 46-53.
- YANG S, ZHU Q, WANG Z C, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene Combined with Polyethylene Packaging Treatment on Storage Quality of Shelled Zizania Latifolia[J]. Food Research and Development, 2023, 44(24): 46-53.
- [16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 49-50.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance on Postharvest Physiological and Biochemical Experiments of

- Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 49-50.
- [17] 钟育富, 刘升, 张琪, 等. 不同处理方法对冷藏保鲜菜心营养及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 159-163.
- ZHONG Y F, LIU S, ZHANG Q, et al. Effects of Different Treatments on Nutrition and Quality of Chinese Flowering Cabbage[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 159-163.
- [18] 曾惠文, 李圆, 赖锦清, 等. 碳酸钙填充聚乙烯薄膜对香蕉保鲜性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(9): 1-5.
- ZENG H W, LI Y, LAI J Q, et al. Study on Preservation Property of Banana with Calcium Carbonate Filled Polyethylene Films[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(9): 1-5.
- [19] 王玲, 陈锐雯, 陈敏惠, 等. 过氧化氢调控菜心采后木质化的机理初探[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 96-107.
- WANG L, CHEN R W, CHEN M H, et al. Regulation of Hydrogen Peroxide on the Lignification of Chinese Flowering Cabbage after Harvest[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 96-107.
- [20] 王盼盼, 管维良, 孙志栋, 等. 芥末精油复合 1-甲基环丙烯保鲜处理对绿花菜贮藏期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 270-279.
- WANG P P, GUAN W L, SUN Z D, et al. The Effect of Mustard Essential Oil Combined 1-Methylcyclopropene Preservation Treatment on the Quality of Broccoli during Refrigerated Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 270-279.