

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80793

四元复合抑菌膜的构建及对圣女果的保鲜增效作用

聂龙英^{1,2} 焦利军³ 杨佳敏¹ 叶文斌^{1,2} 朱秀娟¹

(1. 陇南师范学院农林技术学院, 甘肃 陇南 742500; 2. 陇南特色农业生物资源研究开发中心, 甘肃 陇南 742500;
3. 陇南师范学院机电工程学院, 甘肃 陇南 742500)

摘要: [目的] 优化壳聚糖(CS)—羧甲基纤维素(CMC)复合膜配方, 协同油橄榄果渣多酚(OPP)与姜黄素(Cur)以提升其抑菌性及对圣女果的保鲜效果。[方法] 以CS和CMC为基质, 添加OPP与Cur, 以大肠杆菌抑菌圈直径为指标, 采用响应面法优化其配方。[结果] 最优配方为CS添加量1.5%、CMC添加量3%、OPP添加量8%、Cur添加量3%、甘油添加量0.9%、乙酸添加量1.2% (以水质量计), 所得CS-CMC-PP-OPP-Cur(COPC)膜性能显著提升, 密度为1.773 g/cm³; 拉伸强度为8.78 MPa, 较壳聚糖—羧甲基纤维素(CM)膜提高63.50%; 断裂伸长率为29.79%, 较CM膜提升26.60%; 水蒸气透过率为2.38 mg·mm/(cm²·kPa·d), 较CM膜降低42.93%; 抑菌圈直径为16.39 mm。对圣女果保鲜15 d后, COPC组腐烂率为46.08%、失重率为2.94%、可溶性固形物为27.18%, 均显著优于空白组和对照组, 可滴定酸与维生素C损失率仅为0.32%和0.318%, 货架期>15 d。[结论] COPC膜通过组分协同显著改善物性、阻隔性及抑菌活性, 有效延缓圣女果品质劣变。

关键词: 油橄榄果渣多酚; 姜黄素; 抑菌膜; 圣女果; 包装材料

Construction of a quaternary composite antimicrobial film and its preservation-enhancing effect on cherry tomatoes

NIE Longying^{1,2} JIAO Lijun³ YANG Jiamin¹ YE Wenbin^{1,2} ZHU Xiujuan¹

(1. School of Agriculture and Forestry Technology, Longnan Normal University, Longnan, Gansu 742500, China;
2. Center for Research and Development of Longnan Characteristic Agriculture-Bioresource, Longnan, Gansu 742500, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Longnan Normal University, Longnan, Gansu 742500, China)

Abstract: [Objective] To optimize the formula of a chitosan (CS)-carboxymethyl cellulose (CMC) composite film, and to enhance its antimicrobial activity and preservation effect on cherry tomatoes through the incorporation of olive pomace polyphenols (OPP) and curcumin (Cur). [Methods] CS and CMC are used as the matrix, into which OPP and Cur are incorporated. Then, the formula is optimized using response surface methodology, with the inhibition zone diameter against *E. coli* as the indicator. [Results] The optimal formula is 1.5% CS, 3% CMC, 8% OPP, 3% Cur, 0.9% glycerol, and 1.2% acetic acid, all based on the weight of water. The resulting CS-CMC-OPP-Cur (COPC) film exhibits significantly improved properties. The density is 1.773 g/cm³. The tensile strength is 8.78 MPa, 63.50% higher than that of the chitosan-carboxymethyl cellulose (CM) film. The elongation at break is 29.79%, representing a 26.60% increase over the CM film. The water vapor permeability is 2.38 mg·mm/(cm²·kPa·d), 42.93% lower than that of the CM film, while the inhibition zone diameter reaches 16.39 mm. In cherry tomato preservation tests over 15 days, the COPC coated group exhibits a decay rate of 46.08%, a

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(编号:22YF7FK220); 甘肃省青年科技基金项目(编号:23JRRK0002); 甘肃省数字化专项研究课题(编号:JYSZH[2025]-475); 甘肃省高等学校创新基金项目(编号:2025B-453); 陇南市社会化出资项目(编号:2025SZ16); 陇南师范学院校级重点学科经费资助

通信作者: 聂龙英(1988—), 女, 陇南师范学院讲师, 硕士。E-mail: LYNie0785@Intc.edu.cn

收稿日期: 2025-08-26 **改回日期:** 2026-02-24

引用格式: 聂龙英, 焦利军, 杨佳敏, 等. 四元复合抑菌膜的构建及对圣女果的保鲜增效作用[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 111-120.

Citation: NIE Longying, JIAO Lijun, YANG Jiamin, et al. Construction of a quaternary composite antimicrobial film and its preservation-enhancing effect on cherry tomatoes[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 111-120.

weight loss of 2.94%, and a soluble solid rate of 27.18%, significantly outperforming the blank and control groups. The loss rates of titratable acid and vitamin C are 0.32% and 0.318%, respectively, extending the shelf life beyond 15 days. **[Conclusion]** Through component synergy, the physical properties, barrier performance, and antimicrobial activity of the COPC film are significantly improved, effectively delaying the quality deterioration of cherry tomatoes.

Keywords: olive pomace polyphenol; curcumin; antimicrobial film; cherry tomato; packaging material

圣女果 (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) 富含多种生物活性物质, 具有重要的营养与健康价值^[1]。然而, 其作为典型的呼吸跃变型果实, 采后生理代谢活动旺盛并很快进入呼吸跃变期, 极易因生理性失水软化和病理性微生物侵染导致品质快速劣变^[2]。因此, 开发一种兼具高效抗氧化与广谱抑菌功能的包装材料是维持其采后品质的迫切需求。

传统石油基塑料包装带来的环境负担日益严峻, 且现有活性包装体系普遍存在组分单一、难以协同抑制亲水性与疏水性微生物的局限性, 这共同推动了可生物降解复合包装材料的发展^[3-4]。壳聚糖 (CS) 凭借优异的成膜性、生物相容性及固有抗菌活性, 被视为功能性包装膜的理想基材^[5-6]。然而, 单一壳聚糖膜的力学强度和抗氧化性能显著不足, 限制了其实际应用^[7]。因此, 引入功能组分构建复合膜是提升壳聚糖基包装综合性能的关键策略^[8]。植物多酚因其天然的强抗氧化与广谱抗菌特性, 成为提升包装膜功能性的重要添加剂^[9]。目前, 多种植物源多酚, 如嘉宝果提取物^[10]、葡萄皮多酚^[11]等, 已被成功应用于壳聚糖基复合膜中, 显著提升了薄膜的抗氧化性能, 并在食品保鲜领域展现出潜力。尽管如此, 典型疏水性多酚如姜黄素 (Cur), 虽具有优异生物活性, 其极低的水溶性和化学不稳定性严重制约了其在包装材料中的应用^[12-13]。通过多糖复配^[14]或蛋白包载^[15]策略可在一定程度上改善其溶解性并维持抗氧化活性。

油橄榄果渣多酚 (OPP) 蕴含橄榄苦苷、羟基酪醇等活性物质, 因其显著的抗氧化与抗菌活性已被用于功能食品、抑菌剂及医药等领域^[16-18], 但多酚组分在功能性包装材料中的应用尚未得到系统研究。试验拟以 CS 和羧甲基纤维素 (CMC) 为基材, OPP 和 Cur 为功能添加剂, 采用溶液浇铸法构建多元复合膜 (COPC 膜), 测定 COPC 膜的各种物化性能, 并系统评价其对圣女果采后保鲜效果的影响, 旨在为 OPP 与 Cur 在食品活性包装中的协同应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

油橄榄果渣: 陇南翔宇油橄榄科技开发有限公司;

圣女果: 市售;

福林酚: 生物试剂, 上海麦克林生化科技股份有限公司;

没食子酸: 纯度 $\geq 98\%$, 上海麦克林生化科技股份有限公司;

CS、D-101 大孔树脂、2,6-二氯酚、羧甲基纤维素钠、丙三醇: 上海麦克林生化科技股份有限公司;

大肠杆菌琼脂、胰蛋白胨、酵母浸粉: 国药集团化学试剂有限公司;

乙酸、无水碳酸钠、氢氧化钠、酚酞、无水乙醇等均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

磁力搅拌器: 85-2J 型, 上海添时科学仪器有限公司;

旋转蒸发器: RE-52AA 型, 上海亚荣生化仪器厂;

电热鼓风烘箱: GZX-GFC-101-O-BS 型, 上海博泰实验设备有限公司;

水蒸气透过率测试仪: W309 型, 济南赛成仪器有限公司;

螺旋测微器: 精度 0.001 mm, 南京苏测计量仪器有限公司;

万能试验机: WDW-5 型, 济南万测电气设备有限公司;

超声波清洗机: KQ-2501 型, 上海睿祺有限公司;

真空冷冻干燥机: LGJ-50C 型, 上海贺帆仪器有限公司;

离心机: LC-LX-H185C 型, 力辰科技有限责任公司;

紫外可见分光光度计: UV-2600 型, 岛津仪器有限公司;

多功能粉碎机: 400Y 型, 铂欧五金厂仪器公司。

1.3 方法

1.3.1 OPP 提取 参照聂龙英等^[17]的方法提取油橄榄果渣多酚粗提物, 标记为 OPP; 采用大孔吸附树脂法^[19]对粗提物进行纯化, 经浓缩后得纯化的 OPP 样品, 贮藏备用。

1.3.2 膜制备工艺及操作要点 将 CS 与羧甲基纤维素钠依次加入 50 °C 蒸馏水中溶解, 分取 25 mL 溶液若干份, 分别加入甘油和乙酸作为共混基液。按膜类型分别进行处理: 制备 CM 膜仅需搅拌 0.5 h; 制备 COP 膜需加入 OPP 继续搅拌 10 min; 制备 COPC 膜需加入 OPP 与 Cur 同搅拌 10 min。将所有复合液倒入平板模具, 室温静置 1 h 后, 40 °C 干燥 12 h, 取出平衡 30 min 并剥离, 即得 CM、COP 和 COPC 3 种薄膜。

1.3.3 膜的抑菌活性测定 采用抑菌圈法^[20], 将活化 *E. coli* 涂布于平板, 置入紫外灭菌的 3 mm 复合膜圆片中,

37 ℃培养 24 h 后测量抑菌圈直径。

1.3.4 单因素试验 以复合膜对大肠杆菌抑菌圈为评价指标,分别考察 OPP 添加量(4%, 6%, 8%, 10%, 12%)、CS 添加量(0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%)、CMC 添加量(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)、Cur 添加量(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)、甘油添加量(0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5%)和乙酸添加量(0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5%, 1.8%)对膜抑菌性的影响。

1.3.5 响应面试验 在单因素试验基础上,运用 Design-Expert 12.0 软件中的 Box-Behnken 模型进行响应面试验,确定最佳的 OPP 与 CS 复合膜制备工艺条件。

1.3.6 COPC 膜性能测定

(1) 膜厚度:参照黄坤等^[21]的方法。

(2) 膜密度:参照黄坤等^[21]的方法,将膜切割成 45 mm×12 mm 大小后称重,重复 3 次取平均值,按式(1)计算膜密度。

$$\rho = \frac{m}{s \times d}, \quad (1)$$

式中:

ρ ——膜密度, g/cm³;

m ——膜质量, g;

s ——膜面积, cm²;

d ——膜厚度, cm。

(3) 水蒸气透过率:按 GB/T 1037—2021 执行。

(4) 机械性能测试:使用万能试验机测定 COPC 膜的力学性能^[8]。

1.3.7 膜的外观 将膜裁成 2 cm×2 cm, 贴在图片上拍摄外观。

1.3.8 圣女果的理化指标测定 选用均匀无损伤的圣女果,分为 CK(对照)、CM(CM 膜处理)、COP(COP 膜处理)和 COPC(COPC 膜处理)4 组。处理组均通过成膜技术实现单果包裹,且不作任何密封与外包装。果实于 20 ℃贮藏 15 d,期间每 3 d 测定相关指标,结果取平均值。

(1) 感官品质:参照刘哲^[22]的方法,根据表 1 对圣女果的质地、新鲜度、色泽、气味等进行感官评分,满分 9 分,各指标权重均为 25%。

(2) 失重率:采用称重法^[5],按式(2)计算失重率。

$$z = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

z ——失重率, %;

m_0 ——圣女果果实的初始质量, g;

m_1 ——腐烂圣女果果实质量, g。

(3) 腐烂率:采用称量法^[5],按式(3)计算果实腐烂率。

表 1 圣女果感官评分表

感官指标	评分标准	分值
弹力(9分)	果实完整,硬度大,有弹性	7~9
	果实偏软,回弹性减弱	4~6
	果实软塌,回弹不明显	1~3
新鲜度(9分)	无腐烂,果蒂完整	7~9
	轻微感染,果蒂有烂点	4~6
	果蒂腐烂明显,不可食用	1~3
颜色(9分)	果实鲜亮,光泽度高	7~9
	果实明亮,光泽度下降	4~6
	果实表面暗沉,无光泽	1~3
气味(9分)	果实气味浓郁	7~9
	果实香气变淡	4~6
	混杂其他气味	1~3

$$x = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

x ——腐烂率, %;

m_0 ——圣女果果实的初始质量, g;

m_1 ——腐烂圣女果果实质量, g。

(4) 可滴定酸含量:参照曹建康等^[23]的方法。

(5) 可溶性固形物含量:参照曹建康等^[23]的方法。

(6) 维生素 C 含量:按 GB 5009.86—2016 执行。

1.3.9 数据处理 采用 Excel、SPSS 软件进行数据分析,采用 OriginPro 软件绘图;各试验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示;采用 LSD 法检验, $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 分别表示差异显著和极显著。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 OPP、Cur 添加量对 COPC 膜抑菌性能的影响 由图 1 可知,当 OPP 添加量为 4%~8% 时, COPC 膜的抑菌圈直径随 OPP 添加量的增加呈先增后降的趋势,并在 8% 添加量时达到峰值 14.22 mm。这主要是适量添加多酚能有效破坏细菌细胞膜,而过量添加则会与膜成分发生相互作用,降低其生物可利用性,反而削弱抑菌效果^[24]。因此,选择 OPP 添加量为 8%。

由图 2 可知,当 Cur 添加量为 1%~3% 时,抑菌圈直径逐渐增大,并于添加量 3% 时达到最大值 11.66 mm; Cur 添加量 > 3% 后则出现轻微下降。这可能是 Cur 可渗透菌体细胞壁发挥抗菌作用,过量添加则易发生聚集,导致活性降低^[25]。因此,选择 Cur 添加量为 3%。

2.1.2 CS、CMC 添加量对 COPC 膜抑菌性能的影响 由图 3 可知,当 CS 添加量为 0.5%~1.5% 时,抑菌圈直径呈增

加趋势,在 1.5% 时达到最大 13.81 mm,随后抑菌圈随添加量的增加而降低,可能是 CS 在低添加量时能有效结合大肠杆菌的细胞壁,导致细胞裂解,但过量添加则膜结构致密性下降,抑菌性减弱^[26]。因此,选择 CS 添加量为 1.5%。

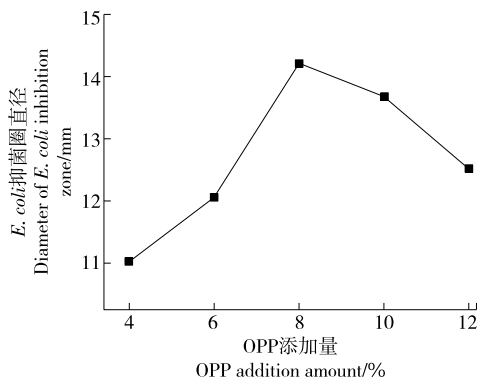


图 1 OPP 添加量对 COPC 膜抑菌性能的影响

Figure 1 Effect of OPP addition amount on the antimicrobial property of COPC films

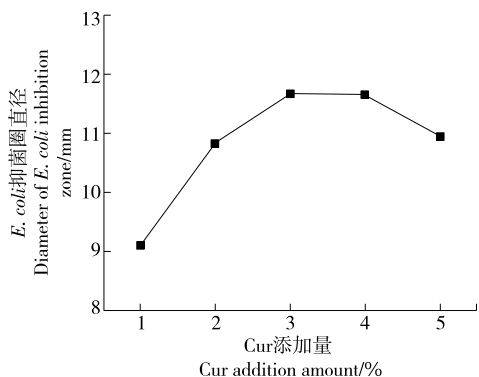


图 2 Cur 添加量对 COPC 膜抑菌性能的影响

Figure 2 Effect of Cur addition amount on the antimicrobial property of COPC films

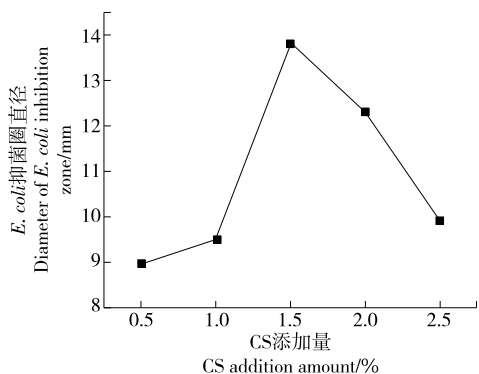


图 3 CS 添加量对 COPC 膜抑菌性能的影响

Figure 3 Effect of CS addition amount on the antimicrobial property of COPC films

由图 4 可知,当 CMC 添加量为 1%~3% 时,大肠杆菌抑菌圈直径从 9.20 mm 逐渐增大至 10.66 mm,表现出持续增强的抑菌效果。当 CMC 添加量 > 3% 后,抑菌圈直径反而减小,可能是膜过密或分子聚集导致抑菌活性成分释放受限,抑菌圈减小。因此,选择 CMC 添加量为 3%。

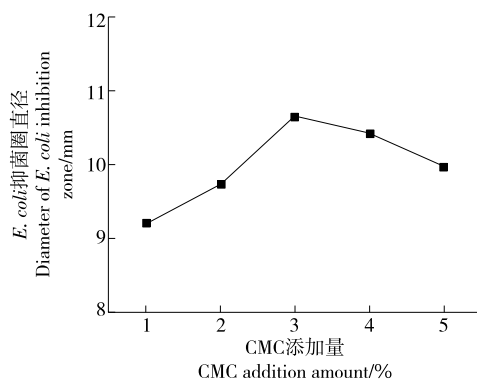


图 4 CMC 添加量对 COPC 膜抗菌性能的影响

Figure 4 Effect of CMC addition amount on the antimicrobial property of COPC films

2.1.3 甘油、乙酸添加量对 COPC 膜抑菌性能的影响 由图 5 可知,当甘油添加量为 0.3%~0.9% 时,抑菌圈直径随甘油添加量的增加而增大,在 0.9% 时达到 13.23 mm;当甘油添加量为 1.5% 时,抑菌圈轻微下降至 11.49 mm。表明添加适量甘油可改善膜均匀性与释放性,添加过量则亲水增强或稀释抗菌成分。因此,选择甘油添加量为 0.9%。

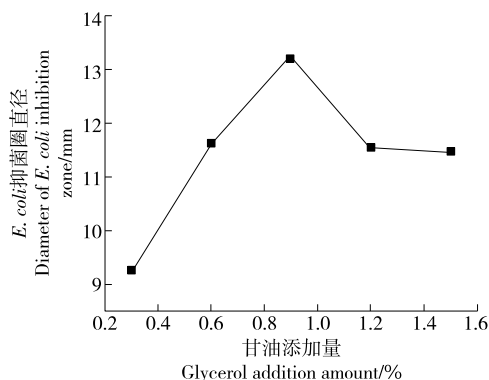


图 5 甘油添加量对 COPC 膜抗菌性能的影响

Figure 5 Effect of glycerol addition amount on the antimicrobial property of COPC films

由图 6 可知,当乙酸添加量为 0.6%~1.2% 时,抑菌圈直径增大,在 1.2% 时达到最大值 12.84 mm;当乙酸添加量 > 1.2% 时抑菌圈直径变小。这可能是因为适量乙酸可降低 pH 抑菌,过量则破坏膜结构或导致渗透性增加^[26]。

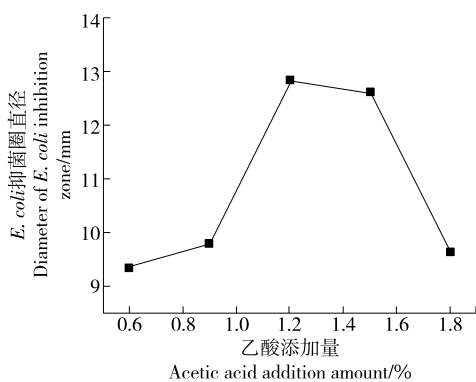


图6 乙酸添加量对COPC膜抗菌性能的影响

Figure 6 Effect of acetic acid addition amount on the antimicrobial property of COPC films

因此,选择乙酸添加量为1.2%。

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面试验设计与结果 在单因素试验基础上,设计四因素三水平响应面试验,试验因素水平见表2,试验设计与结果见表3。

COPC膜大肠杆菌抑菌性模型的二元多次回归方程为:

$$Y=16.33-0.44A-0.51B+0.59C-0.16D+0.34AB-0.90AC-0.46AD-0.26BC+0.44BD-0.48CD-2.43A^2-1.97B^2-1.6C^2-1.88D^2. \quad (4)$$

表2 Box-Behnken设计的因素水平

Table 2 Factors and levels of the Box-Behnken design

水平	A Cur添加量/%	B CS添加量/%	C OPP添加量/%	D 甘油添加量/%
-1	2	1.0	6	0.6
0	3	1.5	8	0.9
1	4	2.0	10	1.2

由表4可知,模型 $P<0.0001$,极显著;失拟项 $P>0.05$,不显著; $R_{adj}^2=0.9764$,模型拟合良好,且试验重现性高,变异系数为2.91%。一次项A、B、C,交互项AC及所有二次项均对抑菌性有极显著影响($P<0.01$),交互项AD、BD、CD对抑菌性的影响显著($P<0.05$),其他项均不显著。各因素影响程度为OPP添加量>CS添加量>Cur添加量>甘油添加量。

2.2.2 各因素交互影响曲面分析 由图7可知,AC、AD、BD及CD的交互作用显著,其他因素之间的交互作用不显著,与方差分析结果吻合。

2.2.3 验证实验 通过Design-Expert 12.0软件分析出COPC膜的最佳制备条件为CS添加量1.68%、甘油添加量0.907%、OPP添加量8.13%、Cur添加量2.65%,此时

表3 响应面试验设计及结果

Table 3 Response surface experimental designs and results

试验号	A	B	C	D	大肠杆菌抑菌圈直径/mm
1	0	0	1	1	12.85
2	0	0	0	0	16.27
3	0	0	0	0	16.42
4	-1	0	0	-1	12.05
5	1	1	0	0	11.27
6	1	0	0	-1	11.78
7	1	0	1	0	11.76
8	0	0	-1	-1	12.02
9	1	-1	0	0	11.70
10	-1	0	1	0	14.29
11	1	0	0	1	11.27
12	-1	1	0	0	11.80
13	0	0	-1	1	12.80
14	0	1	1	0	13.16
15	-1	-1	0	0	13.40
16	0	1	-1	0	11.80
17	0	-1	1	0	14.27
18	0	-1	-1	0	12.26
19	-1	0	0	1	13.20
20	0	-1	0	-1	13.75
21	0	-1	0	1	11.69
22	-1	0	-1	0	11.27
23	0	0	0	0	16.24
24	0	0	1	-1	14.09
25	0	0	0	0	16.45
26	0	0	0	0	16.07
27	0	1	0	1	12.23
28	0	1	0	-1	11.95
29	1	0	-1	0	12.15

COPC膜的抑菌圈直径为16.45 mm。为方便操作,将最佳制备条件修正为CS添加量1.5%、甘油添加量0.9%、OPP添加量8%、Cur添加量3%、CMC添加量3%、乙酸添加量1.2%(以水质量为基准),此条件下COPC膜的抑菌圈直径为16.39 mm,与预测值误差为0.37%,说明试验模型可信度高,可运用该响应模型进行工艺条件优化。

2.3 COPC膜的理化性能及抑菌性能

2.3.1 COPC膜密度、厚度和水蒸气透过率 由图8可知,CM膜密度为1.792 g/cm³,厚度为52 μm,水蒸气透过率为4.17 mg·mm/(cm²·kPa·d)。COP膜因分子间作用力调整,密度微降至1.781 g/cm³,降幅0.61%;同时因多酚嵌入厚度增至52.8 μm,增幅1.54%。进一步引入Cur形成的

表 4 方差分析[†]

Table 4 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	83.52	14	5.97	41.31	<0.000 1	**
A	2.31	1	2.31	16.03	0.001 3	**
B	3.11	1	3.11	21.55	0.000 4	**
C	4.11	1	4.11	28.44	0.000 1	**
D	0.30	1	0.30	2.08	0.170 9	
AB	0.48	1	0.48	3.30	0.090 9	
AC	3.26	1	3.26	22.56	0.000 3	**
AD	0.83	1	0.83	5.74	0.031 2	*
BC	0.28	1	0.28	1.91	0.188 7	
BD	0.79	1	0.79	5.49	0.034 5	*
CD	0.92	1	0.92	6.38	0.024 2	*
A ²	38.39	1	38.39	265.90	<0.000 1	**
B ²	25.18	1	25.18	174.41	<0.000 1	**
C ²	16.64	1	16.64	115.24	<0.000 1	**
D ²	22.84	1	22.84	158.21	<0.000 1	**
残差	2.02	14	0.14			
失拟项	1.88	10	0.19	5.28	0.061 5	
纯误差	0.14	4	0.04			
总离和	85.54	28				

† **表示差异极显著(P<0.01);*表示差异显著(P<0.05)。

COPC膜,得益于Cur与多酚的协同交联作用^[27],密度显著降至 1.773 g/cm³,较 CS 膜降低 1.06%,厚度增至 53.3 μm,较 CM 膜增加 4.51%,且其水蒸气透过率显著降至 2.38 mg·mm/(cm²·kPa·d),较 CM 膜降低 42.93%。

2.3.2 COPC膜的拉伸强度、断裂伸长率和抑菌性 由图9可知,COP膜因多酚的刚性增强效应,拉伸强度较CM膜提升16.01%(至6.23 MPa),断裂伸长率提升16.66%(至27.45%)。而COPC膜通过Cur协同多酚构建三维网络^[28],拉伸强度进一步提升40.93%(至8.78 MPa),断裂伸长率增至29.79%;其抑菌性能因Cur的广谱抗菌活性产生飞跃,抑菌圈直径达16.45 mm,较COP膜提升28.92%,较CS膜提升92.85%。

2.3.3 COPC膜外貌 由图10可知,CM、COP和COPC膜分别呈浅黄、棕黄和亮黄色。该颜色变化主要源于功能性成分的添加及其相互作用。OPP的加入导致多酚氧化,使COP膜颜色加深呈棕黄色;而COPC膜因引入Cur,其自身鲜亮的黄色与原有多酚体系发生显色协同,最终呈现明亮的黄色。这一颜色梯度直观反映了各活性成分的成功整合与可能的分子协同作用。

2.4 保鲜膜对甜圣女果的保鲜效果

2.4.1 对圣女果感官评价的影响 由表5可知,贮藏0~6 d,各组感官评分差异不明显,第9天后CK组和CM组果蒂干黄、果实软塌,出现轻微感染;第12天时COP组颜色变暗、光泽下降。相比之下,COPC组在整个贮藏期间

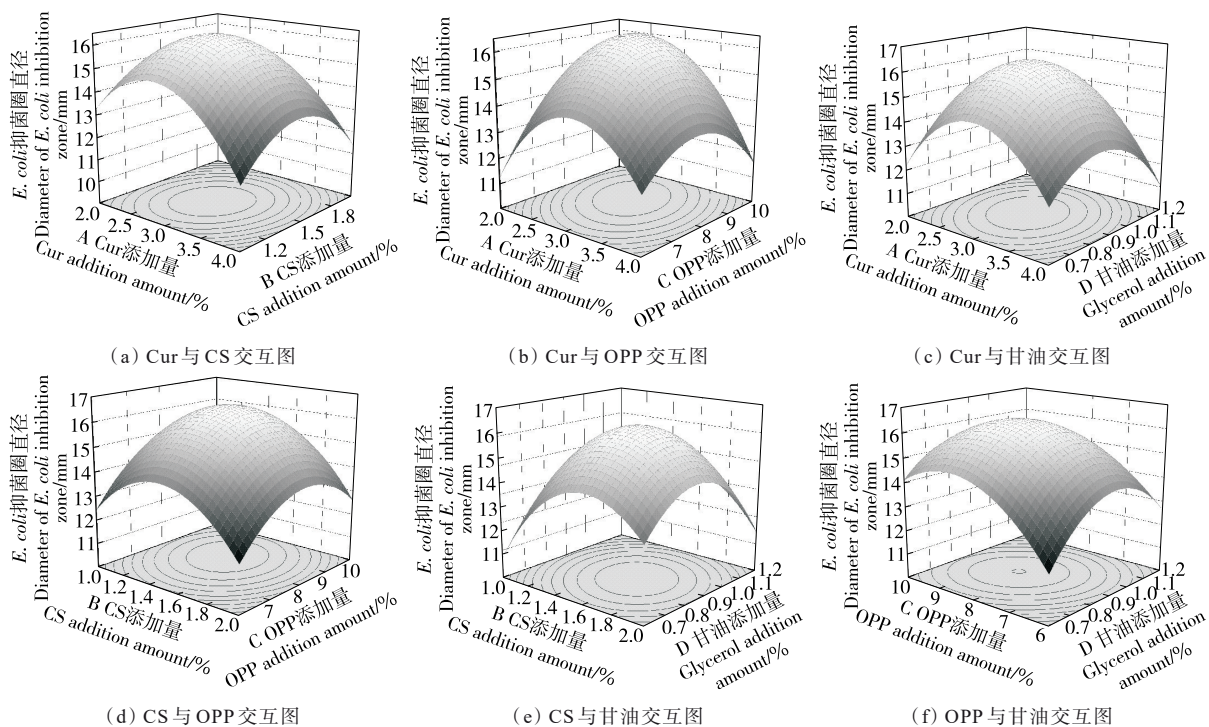


图 7 COPC膜抑制大肠杆菌的因素交互效应响应面分析

Figure 7 Response surface analysis of factor interaction effect of COPC film inhibiting *E. coli*

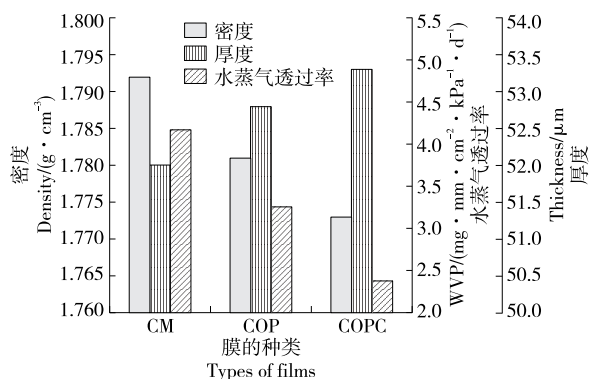


图8 3种膜的密度、厚度与水蒸气透过率

Figure 8 Density, thickness, and water vapor permeability of three kinds of films

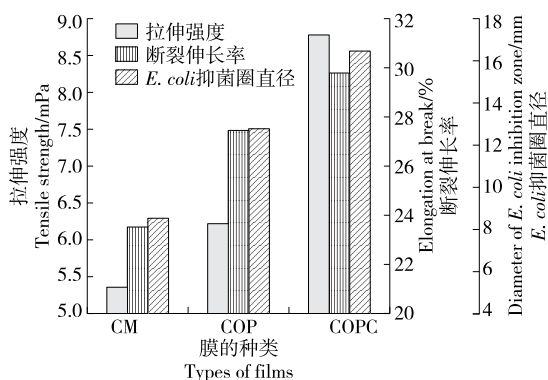


图9 3种膜的拉伸强度、断裂伸长率、抑菌圈直径

Figure 9 Tensile strength, elongation at break, and inhibition zone diameter of three kinds of films

均保持外观良好,无腐败迹象,直至第15天表面才稍软。贮藏第15天,CK、CM、COP和COPC组感官评分分别为2.75,3.00,5.00,7.00,表明COPC膜具有显著的保鲜效果。

2.4.2 对圣女果失重率的影响 由图11可知,贮藏前6d,各组圣女果质量变化不显著;贮藏6d后均呈下降趋势。CK组失重率最高,COPC组始终最低,为0.32%~2.94%,表明3种覆膜均能有效抑制水分流失,且以COPC效果最佳。其优势源于Cur协同构建了更致密稳定的网

表5 不同膜包覆处理对圣女果感官评分的影响

Table 5 Effects of different film coating treatments on sensory scores of cherry tomatoes

贮藏时间/d	CK组	CM组	COP组	COPC组
0	10.00	10.00	10.00	10.00
3	8.66	8.85	8.97	9.34
6	7.34	8.04	8.46	8.85
9	5.18	6.32	7.49	8.32
12	3.27	4.50	6.68	7.61
15	2.75	3.00	5.00	7.00

络结构,显著提升了阻隔性能^[29],说明该致密网络能有效阻碍水分子扩散。COPC膜的保鲜效果远优于刘端武等^[30]报道的聚乙烯醇—果胶—乳清蛋白复合膜的,展现出显著优势与应用潜力。

2.4.3 对圣女果腐烂率的影响 由图12可知,贮藏期间,各组腐烂率均呈线性上升趋势。贮藏第15天,CK组腐烂率高达(85.36±2.1)%,而COPC组仅(46.08±1.5)%,较CK组显著降低39.28%。同时,COPC组的抑菌效果也优于CM与COP组,腐烂率分别下降19.59%和6.08%。贮藏第12天,COPC组的圣女果防腐效果与曲梦锐等^[31]报道的壳聚糖—芫荽精油复合涂膜的相当。表明Cur的引入显著增强了COPC膜的生物活性,从而有效抑制微生物腐败,展现出最优的保鲜性能。

2.4.4 对圣女果中可溶性固形物含量的影响 由图13可知,贮藏期间,可溶性固形物含量整体呈上升趋势。贮藏第15天,COPC组可溶性固形物含量为6.79%,显著高于COP(6.68%)、CM(6.43%)及CK(6.00%)组,也高于刘畅等^[1]的复合膜。说明COPC处理能更有效延缓果实的成熟与衰老进程,抑制其水分与营养物质的消耗。

2.4.5 对圣女果中可滴定酸含量的影响 由图14可知,贮藏期间,可滴定酸含量因呼吸消耗而普遍下降,但不同处理间差异显著:CK组降解最多,COPC组降幅最小,其含量从0.76%降至0.57%。可滴定酸的降解速率直接反映了果实的代谢强度。因此,COPC组能最有效减缓酸度下降,这得益于其形成的致密膜结构能有效抑制果实呼



图10 3种膜的外观

Figure 10 Appearance of three kinds of films

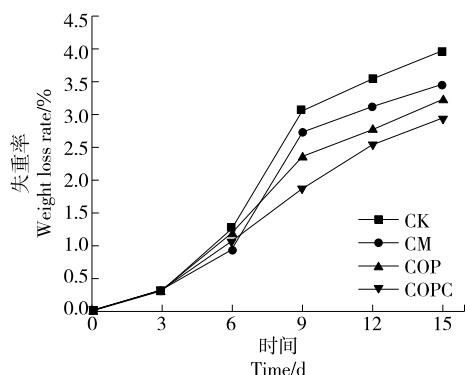


图 11 不同膜包覆处理对圣女果失重率的影响

Figure 11 Effects of different film coating treatments on weight loss rate of cherry tomatoes

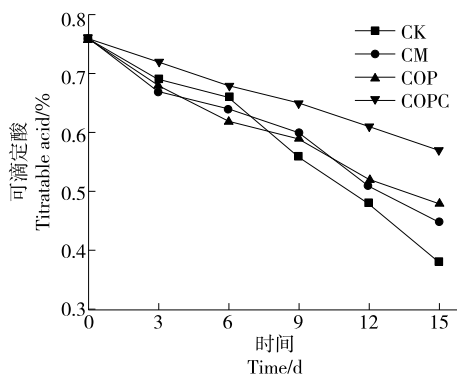


图 14 不同膜包覆处理对圣女果可滴定酸含量的影响

Figure 14 Effect of different film coating treatments on titratable acid content in cherry tomatoes

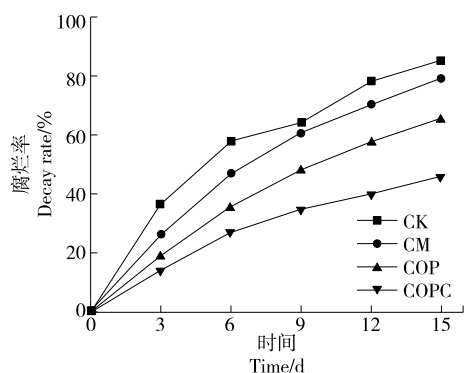


图 12 不同膜包覆处理对圣女果腐烂率的影响

Figure 12 Effects of different film coating treatments on decay rate of cherry tomatoes

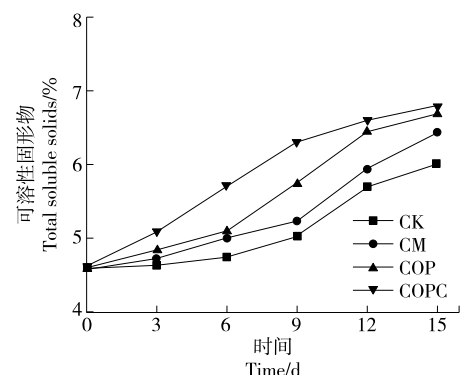


图 13 不同膜包覆处理对圣女果可溶性固形物含量的影响

Figure 13 Effect of different film coating treatments on soluble solid content in cherry tomatoes

吸, 延缓后熟, 从而更好地维持果实的风味与品质^[21]。

2.4.6 对圣女果中维生素 C 含量的影响 由图 15 可知, 贮藏期间, 各组维生素 C 含量均呈下降趋势, 但不同处理间差异显著。其中, CK 组的维生素 C 损耗最为严重, 从 32.28 mg/100 g 大幅降至 24.40 mg/100 g; 而 COPC 组的维

生素 C 保留率最高, 仅从 32.28 mg/100 g 降至 29.10 mg/100 g, 其终值也显著高于文献[31]的。维生素 C 是评价果实营养品质与氧化衰老程度的关键指标。综上, COPC 膜可凭借其优异阻隔性形成低氧环境, 抑制果实呼吸作用并延缓后熟, 从而降低代谢强度、减少维生素 C 的消耗; 同时, 其物理阻隔与 Cur 生物活性可协同抑制酶促褐变与微生物活动, 减缓氧化衰老进程^[2]。

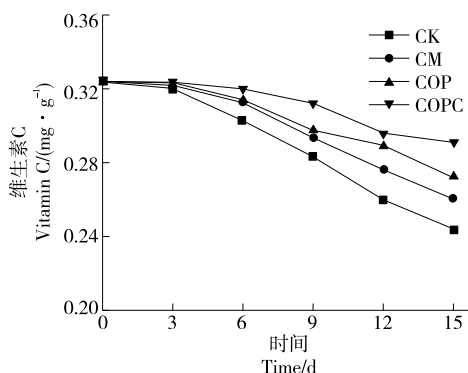


图 15 不同膜包覆处理对圣女果维生素 C 含量的影响

Figure 15 Effect of different film coating treatments on V_C content of cherry tomatoes

3 结论

壳聚糖—羧甲基纤维素—油橄榄果渣多酚—姜黄素多元抑菌复合膜的最佳配比为壳聚糖添加量 1.5%、羧甲基纤维素添加量 3%、油橄榄果渣多酚添加量 8%、姜黄素添加量 3%、甘油添加量 0.9%、乙酸添加量 1.2%。该复合膜外观由壳聚糖—羧甲基纤维素膜的浅黄色、壳聚糖—羧甲基纤维素—油橄榄果渣多酚膜的棕黄色, 最终转变为鲜艳的亮黄色, 直观反映了姜黄素与多酚的添加与协同作用。基于两者分子协同效应, 壳聚糖—羧甲基纤维素—油橄榄果渣多酚—姜黄素膜形成致密三维网络结

构,性能显著提升,密度降至 1.773 g/cm^3 ,水蒸气透过率低至 $2.38\text{ mg}\cdot\text{mm}/(\text{cm}^2\cdot\text{kPa}\cdot\text{d})$,较壳聚糖-羧甲基纤维素膜下降42.93%;拉伸强度为8.78 MPa,断裂伸长率为29.79%,分别较壳聚糖-羧甲基纤维素膜提高63.50%和26.60%;抑菌性能明显增强,大肠杆菌抑菌圈直径达16.39 mm,较壳聚糖-羧甲基纤维素膜提升92.8%。在圣女果保鲜应用中,壳聚糖-羧甲基纤维素-油橄榄果渣多酚-姜黄素膜可有效延缓代谢与抑制腐败,贮藏15 d后,该组圣女果的可滴定酸、维生素C损失率、腐烂率和失重率均显著低于对照组,感官评分为7分,显示出良好的保鲜应用潜力。该研究未评估复合膜中姜黄素和多酚的特殊气味是否迁移至食品从而影响风味,活性成分在保鲜过程中的释放规律与稳定性尚不明确,且保鲜验证仅局限于圣女果单一品种,结论缺乏普适性。后续研究可增设感官评定环节验证风味影响,通过测定浸出液抑菌活性探究释放规律,并拓展草莓、葡萄等多种易腐果蔬进行应用验证。

参考文献

- [1] 刘畅,周舟,陈秋怡,等. 茶多酚/壳聚糖/百里香精油复合涂膜对圣女果保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2025, 46(3): 104-112.
LIU C, ZHOU Z, CHEN Q Y, et al. Effect of tea polyphenols/chitosan/thyme oil composite coating on preservation of cherry tomatoes[J]. Packaging Engineering, 2025, 46(3): 104-112.
- [2] 吴焯. 脉冲电场强化大豆分离蛋白-壳聚糖相互作用制备高阻隔性保鲜膜研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024: 47.
WU Y. Preparation of high-barrier cling film by pulsed electric field-enhanced soybean isolate protein-chitosan interactions[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024: 47.
- [3] 卢嘉敏. 绿色可降解食品保鲜材料的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(S2): 77-81.
LU J M. Research progress of green degradable food preservation materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(S2): 77-81.
- [4] 胡预龙,张如强,李文俊,等. 生物可降解食品包装材料的进展[J]. 精细化工, 2025, 42(6): 1 211-1 220.
HU Y L, ZHANG R Q, LI W J, et al. Research progress on biodegradable food packaging materials[J]. Fine Chemicals, 2025, 42(6): 1 211-1 220.
- [5] 连欢,孙占新,杨相政. 壳聚糖抑菌复合膜对蓝莓贮藏保鲜效果的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(9): 29-34.
LIAN H, SUN Z X, YANG X Z. Effect of antibacterial chitosan composite film on storage and preservation of blueberry[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(9): 29-34.
- [6] FONSECA-GARCÍA A, JIMÉNEZ-REGALADO E J, AGUIRRE-LOREDO R Y. Preparation of a novel biodegradable packaging film based on corn starch-chitosan and poloxamers [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117009.
- [7] 项丹丹,项梦丹,孙龙. 银负载槲皮素-壳聚糖复合膜的制备及其对草莓的保鲜效果[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(9): 69-75.
XIANG D D, XIANG M D, SUN L. Preparation of silver-loaded quercetin-chitosan composite membrane and its preservation effect on strawberries[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(9): 69-75, 88.
- [8] 郭培锋,吴雨威,谢杏婵,等. 壳聚糖-大豆分离蛋白复合膜制备工艺优化及对芒果的保鲜效果[J]. 食品与机械, 2025, 41(1): 149-157.
GUO P F, WU Y W, XIE X C, et al. Optimization of chitosan-soy protein isolate composite film fabrication and its preservation effect on mangoes[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 149-157.
- [9] 闫运开,宋见喜,毛迪锐,等. 植物多酚-壳聚糖抑菌保鲜膜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 326-331.
YAN Y K, SONG J X, MAO D R, et al. Research progress of plant polyphenol-chitosan antibacterial plastic wrap[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 326-331.
- [10] 洪鹏,蓝凤霞,李剑,等. 嘉宝果提取物/壳聚糖复合膜的制备及应用研究[J]. 塑料包装, 2024, 34(3): 36-40, 25.
HONG P, LAN F X, LI J, et al. Study on the preparation and application of myrciaria cauliflora extract/chitosan composite films[J]. Plastics Packaging, 2024, 34(3): 36-40, 25.
- [11] 李霞,高恒芳,白哲,等. 葡萄皮渣多酚-壳聚糖复合可食膜的性能及应用[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(2): 26-34.
LI X, GAO H F, BAI X, et al. Properties and application of grape pomace polyphenol-chitosan composite edible film[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42(2): 26-34.
- [12] XU P C, WANG T, HE J, et al. Antibacterial rice protein nanoparticles with a high curcumin loading for fruit preservation[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104935.
- [13] 庄迪. 姜黄素-虫胶纳米颗粒光敏抑菌明胶膜的制备及保鲜机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024: 36.
ZHUANG D. Photodynamic-responsive and antibacterial gelatin-based film with curcumin-shellac nanoparticles: study on formation and preservation mechanism[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2024: 36.
- [14] GUO Q, SU J Q, SHU X, et al. Production and characterization of pea protein isolate-pectin complexes for delivery of curcumin: effect of esterified degree of pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105777.
- [15] 李婷,刘蕾,黄敏,等. 负载姜黄素的玉米醇溶蛋白-羧甲基壳聚糖纳米复合物的制备表征、体外消化及其抗氧化活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 110-117.
LI T, LIU L, HUANG M, et al. Preparation, characterization, *in vitro* digestion, and antioxidant activity of curcumin-loaded zein-carboxymethyl chitosan nano complexes[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 110-117.
- [16] YAMADA N, MATSUSHIMA-NISHIWAKI R, MASUE A, et al. Olive oil polyphenols suppress the TGF- α -induced

- migration of hepatocellular carcinoma cells[J]. *Biomedical Reports*, 2019, 1(1): 1-5.
- [17] 聂龙英, 苏满春, 焦利军, 等. 响应面法优化油橄榄果渣多酚提取工艺及其抑菌活性研究[J]. *中国饲料*, 2025(13): 49-56.
- NIE L Y, SU M C, JIAO L J, et al. Optimization of extraction technology of polyphenols from olive pomace by response surface methodology and its antibacterial activity[J]. *China Feed*, 2025(13): 49-56.
- [18] MIAO Y X, XU Y, GAO J, et al. Transcriptomic analysis reveals molecular mechanism by which Chinese olive fruit prolongs lifespan of *Caenorhabditis elegans*[J]. *NPJ Science of Food*, 2025, 9(1): 90.
- [19] 尚方园. 橄榄叶中多酚物质的提取、分离、纯化及其在核桃油中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 38.
- SHANG F Y. Extraction, separation and purification of polyphenols from olive leaves and their application in walnut oil[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 38.
- [20] 聂龙英, 焦利军, 卓平清, 等. 油橄榄果渣多酚基抗氧化膜的制备及其抑菌活性的测定[J]. *包装与食品机械*, 2025, 43(4): 77-86.
- NIE L Y, JIAO L J, ZHUO P Q, et al. Preparation of olive pomace polyphenols-based antioxidant film and determination of its antibacterial activity[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2025, 43(4): 77-86.
- [21] 黄坤, 黄世豪, 莫璧良, 等. 枇杷叶提取物与壳聚糖复合膜的制备、表征及其在香蕉保鲜中的应用[J]. *食品科技*, 2023, 48(11): 198-207.
- HUANG K, HUANG S H, MO B L, et al. Preparation and characterization of loquat leaf extract and chitosan composite film and its application in banana preservation[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(11): 198-207.
- [22] 刘哲. 两种微藻多糖与壳聚糖复合膜的制备、表征及其防腐保鲜功效[D]. 晋中: 山西农业大学, 2021: 49.
- LIU Z. Preparation, characterization and preservative effect of two kinds of microalgae polysaccharide and chitosan composite membranes[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021: 49.
- [23] 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: 18-20.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance for postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 18-20.
- [24] 徐元柳, 刘迪迪, 王兆丹, 等. 植物提取物抑菌机理及联合现代新兴技术在肉类保鲜中的应用进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 238-244.
- XU Y L, LIU D D, WANG Z D, et al. Research progress on the antibacterial mechanism of natural plant extracts and its application in meat preservation by combining with modern emerging technologies[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 238-244.
- [25] 周阿容. 基于姜黄素/ β -环糊精的光敏减菌膜的制备与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2020: 28.
- ZHOU A R. Preparation and application of photodynamic antibacterial film based on curcumin/ β -cyclodextrin[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020: 28.
- [26] 刘新宇. 天然多糖基薄膜在食品保鲜及智能化检测中的应用[D]. 烟台: 烟台大学, 2025: 33.
- LIU X Y. Applications of natural polysaccharide-based films in food preservation and smart monitoring[D]. Yantai: Yantai University, 2025: 33.
- [27] HAN J, CHEN F L, GAO C C, et al. Environmental stability and curcumin release properties of Pickering emulsion stabilized by chitosan/gum Arabic nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 157: 202-211.
- [28] LIU Y J, CAI Y X, JIANG X Y, et al. Molecular interactions, characterization and antimicrobial activity of curcumin-chitosan blend films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 564-572.
- [29] XIAO Y Q, LIU Y N, KANG S F, et al. Development of pH-responsive antioxidant soy protein isolate films incorporated with cellulose nanocrystals and curcumin nanocapsules to monitor shrimp freshness[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106893.
- [30] 刘端武, 廖海周, 杨敏, 等. 聚乙烯醇-果胶-乳清蛋白复合膜性能及其在圣女果保鲜中应用的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(10): 119-127.
- LIU D W, LIAO H Z, YANG M, et al. Properties of polyvinyl alcohol-pectin-whey protein composite film and application in cherry tomato preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(10): 119-127.
- [31] 曲梦锐, 刘雨辰, 曹恺洋, 等. 壳聚糖与芫荽精油复合涂膜在圣女果保鲜中的应用研究[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(6): 117-122.
- QU M R, LIU Y C, CAO K Y, et al. Application of composite coating film of chitosan and coriander essential oil in fresh-keeping of cherry tomatoes[J]. *China Food Additives*, 2024, 35(6): 117-122.