DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260223002
引用格式: 宾欣, 胡月, 王春琴, 等. 负载茶多酚的壳聚糖/明胶抗菌复合膜构建及保鲜性能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 256–263.
Bin Xin, Hu Yue, Wang Chunqin, et al. Development of tea polyphenol-loaded chitosan/gelatin antibacterial composite films and study on their preservation properties [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 256–263. (in Chinese with English abstract).

负载茶多酚的壳聚糖/明胶抗菌复合膜构建及保鲜性能研究

宾 欣, 胡 月, 王春琴, 胡 灏, 刘石刚, 赵 倩*
(湖南农业大学食品科学技术学院, 长沙 410128)

摘 要: 目的 以壳聚糖(chitosan, CS)、明胶(gelatin, GEL)为成膜基材, 茶多酚(tea polyphenols, TP)为活性添加剂, 制备一种具有抗菌功能的复合膜。**方法** 通过溶液共混流延成膜法制备不同 TP 添加量的 CS/GEL 复合膜, 分析测定膜的含水量、水溶性、溶胀率、透光率、抗菌活性及对草莓的保鲜效果。**结果** CS/GEL/TP 复合膜外观平整, TP 的引入优化了复合膜的性能, 当 TP 添加量为 1.5%时, 复合膜综合性能最佳, 紫外光透光率低至 0.113%, 对大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)的抑菌率分别达 73.34%和 99.78%。草莓保鲜实验中, 该复合膜有效抑制果实的重量损失, 11 d 后损失率低至 15.27%, 延缓了草莓的感官劣变, 货架期延长了 4 d。**结论** 适当添加 TP 的 CS/GEL 复合膜的含水量、水溶性、溶胀度、紫外光透光率及抗菌活性等性能得到提升, 有效地延长了草莓的保存期, 在水果保鲜领域具有一定的应用潜力。

关键词: 壳聚糖; 明胶; 茶多酚; 复合膜; 保鲜
中图分类号: TS206.4; TS255.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0256–08

Development of tea polyphenol-loaded chitosan/gelatin antibacterial composite films and study on their preservation properties

BIN Xin, HU Yue, WANG Chun-Qin, HU Hao, LIU Shi-Gang, ZHAO Qian*
(*College of Food Science and Technology*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*)

ABSTRACT: Objective To prepare a composite film with antibacterial function using chitosan (CS) and gelatin (GEL) as film-forming substrates and tea polyphenols (TP) as an active additive. **Methods** CS/GEL composite films with different TP additions were prepared by solution blending and casting method. The water content, water solubility, swelling degree, light transmittance, antibacterial activity and preservation effect on strawberries of the films were analyzed and determined. **Results** The CS/GEL/TP composite films exhibited a smooth appearance. The

收稿日期: 2026-02-23
基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ5189)
第一作者: 宾欣(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品贮藏与保鲜。E-mail: 2521663615@qq.com
***通信作者:** 赵倩(1989—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品分析。E-mail: zhaoqian@hunau.edu.cn

introduction of TP optimized the properties of the composite films. When the TP addition was 1.5%, the composite film showed the best overall performance: the ultraviolet light transmittance was as low as 0.113%, and inhibition rates against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* reached 73.34% and 99.78%, respectively. In the strawberry preservation experiment, the composite film effectively inhibited the weight loss of the fruits, with a loss rate as low as 15.27% after 11 days, delayed the sensory deterioration of strawberries, and extended the shelf life by 4 days. **Conclusion** The water content, water solubility, swelling degree, ultraviolet light transmittance and antibacterial activity of the CS/GEL composite film with appropriate addition of TP are improved, effectively prolonging the preservation period of strawberries, and showing a certain application potential in the field of fruit preservation.

KEY WORDS: chitosan; gelatin; tea polyphenols; composite films; preservation

0　引　言

在食品供应链中, 外包装材料在食品流通过程中发挥着至关重要的作用。食品表面极易受到环境中微生物的侵染, 外界环境中的细菌、真菌等微生物会利用食品中的营养物质生长繁殖, 导致产品腐败、变色、变味等感官劣变, 许多食源性致病菌还会引发食源性疾病, 严重影响人体健康。因此, 开发具有抑菌功能的抗菌食品包装材料, 通过直接抑制或杀灭包装界面及食品表面的微生物, 成为阻断微生物污染链条、延长食品货架期、提升食品安全性的有效策略之一, 对保障食品安全与人体健康具有重要意义[1]。

壳聚糖(chitosan, CS)由甲壳素脱乙酰化得到, 具有生物可降解性、抗菌活性及良好的成膜性, 在食品包装领域具有重要应用价值[2–3]。但单组分壳聚糖膜在力学性能、阻隔性能等方面存在不足。因此, 以壳聚糖为基质复合其他助剂以增强综合性能成为近年研究热点[4]。明胶(gelatin, GEL)是胶原蛋白水解产物, 为水溶性多肽混合物, 原料易得、生物安全性突出[5]。在水中明胶通过三螺旋结构与水分子缔合形成三维氢键网络, 是理想的成膜基质[6]。然而与壳聚糖相似, 纯明胶膜存在机械强度不足、脆性明显及溶胀度高等缺陷, 制约其实际应用, 通过与其他高分子复合可改善其力学和阻水性能[7]。在酸性介质中, 壳聚糖分子链质子化后携带阳离子基团, 而明胶作为两性电解质呈现负电特性, 这种电荷互补特性使复合体系结晶度下降, 成膜性提高, 二者复合能改善力学性能并降低水溶性[8]。茶多酚(tea polyphenols, TP)是从茶叶中提取的多酚类物质, 具有良好的抑菌性与抗氧化性, 常被用作食品抗氧化剂和护色剂[9]。研究表明, 茶多酚与其他功能性材料复合时能产生显著的协同效应, 大幅提升保鲜性能[10]。茶多酚富含酚羟基, 当与壳聚糖、明胶等材料复合时, 这些活性基团能与其他官能团相互作用, 提升复合膜的拉伸强度、抗氧化及抗菌等性能[11–12]。

目前, 以 TP 为活性抗菌物质, 与 CS、GEL 3 者共混制备复合膜的研究鲜见报道。TP 作为一种广谱高效的天然植物多酚, 其引入有望赋予复合膜优异的抑菌性能。草莓采后极易失水萎蔫和腐烂变质, 货架期短, 因此是评价食品包装保鲜效果的理想模型。基于此, 本研究以 CS 和 GEL 为成膜基材, TP 为活性抗菌剂, 采用溶液共混流延成膜法制备 CS/GEL/TP 复合膜, 系统考察 TP 添加量对复合膜理化特性、抗菌活性及对草莓保鲜效果的影响, 旨在开发一种综合性能良好、具有应用潜力的新型抗菌复合膜, 为活性包装材料的研发提供基础数据和理论参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

新鲜草莓: 长沙市场; 革兰氏阴性大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*) (CMCC 44102)、革兰氏阳性金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*) (CMCC 26003)(中国医学细菌菌种保藏管理中心)。

TP(纯度 98%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); CS(脱乙酰度≥95%, 分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 甘油(分析纯, 山东科源生化有限公司); GEL(化学纯, 国药集团化学试剂有限公司); 冰醋酸(分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 实验中使用的水均为超纯水。

1.2　仪器与设备

BSA124S 分析天平[精度 0.01 mg, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; UV-2600 紫外分光光度仪(岛津企业管理有限公司); HJ-6B 磁力搅拌器(金坛区白塔新宝仪器厂); Spark 多功能酶标仪(瑞士 Spark 仪器公司); DGG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司); DHP-9272B 电热恒温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); XFH-50CA 电热式压力蒸汽灭菌锅(浙江新丰医疗器械有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　CS/GEL/TP 复合膜的制备

(1) CS 溶液的制备。如图 1(A)所示, 用分析天平准确称取 3.00 g CS 粉末分散于 200 mL 的去离子水中, 并加入 1%的冰醋酸溶液, 利用磁力恒温搅拌器搅拌至完全溶解, 备用。

(2) GEL 溶液的制备。如图 1(B)所示, 用分析天平准确称取 1.875 g GEL 粉末分散于 150 mL 的去离子水中, 利

用磁力恒温搅拌器于 40 ℃搅拌至完全溶解，备用。

(3) CS/GEL/TP 复合膜的制备。如图 1(C)所示，将 CS 溶液和 GEL 溶液按体积比 3:2 的比例混合[13]，并加入 2%的甘油，分别加入 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%的 TP，利用磁力恒温搅拌器于 40 ℃搅拌至完全溶解。取 20 mL CS/GEL/TP 复合溶液倒入平板，静置消泡后，置于 60 ℃烘箱中干燥 24 h，揭膜后得复合膜备用。

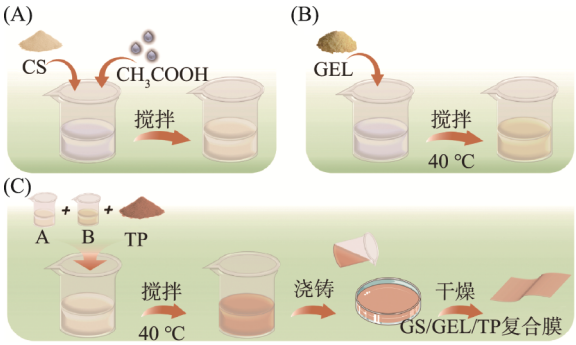


图 1 CS/GEL/TP 复合膜的制备流程图

Fig.1 Flowchart for the preparation of CS/GEL/TP composite films

1.3.2 复合膜厚度的测定

使用电子数字千分尺(精度为 0.001 mm)对复合膜厚度进行测量。通过对 3 组平行样品的测量结果取平均值作为薄膜的最终厚度。

1.3.3 含水量、水溶性和溶胀度的测定

参考李双建等[14]的方法，将薄膜分成同等的大小并称重记为 m_1，然后在 105 ℃烘干 12 h 至恒重记为 m_2。将上述膜置于 30 mL 去离子水中静置 24 h，取出后擦去膜表面水分并称重记 m_3。后将膜再次在 105 ℃下，将其干燥至恒重，称重记为 m_4。使用公式(1)计算含水量:

$$含水量/\%=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 表示样品初始质量, g; m_2 为第一次恒重后的质量, g。

使用公式(2)计算水溶性:

$$水溶性/\%=\frac{m_2-m_4}{m_2}\times 100\% \quad (2)$$

式中: m_2 为第一次恒重后的质量, g; m_4 为第二次恒重后的质量, g。

使用公式(3)计算溶胀率:

$$溶胀率/\%=\frac{m_3-m_2}{m_2}\times 100\% \quad (3)$$

式中: m_2 为第一次恒重后的质量, g; m_3 为样品浸泡后擦去表面水分重量, g。

1.3.4 透光率的测定

将复合膜裁切成 10 mm×40 mm 的矩形条，紧密贴于比色皿外壁。以空白比色皿为对照，采用紫外可见分光光度计在 200~800 nm 波长范围内扫描，测定薄膜的透光率[15]。

1.3.5 抗菌性能的测定

参考 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》，采用标准菌落计数法评估不同薄膜对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抗菌活性。将薄膜浸泡在细菌悬浮液(1 mL, 10^4 CFU/mL)中 2 h。接下来，将 100 μL 稀释液涂布到琼脂平板上。以无膜细菌溶液为对照组。培养 12 h 后，计数并计算可见的菌落单位。使用公式(4)确定薄膜的抑菌率:

$$抑菌率/\%=\frac{N_0-N_1}{N_0}\times 100\% \quad (4)$$

式中: N_0 为对照组菌落数量; N_1 为实验组菌落数。

1.3.6 草莓果实保鲜性能测试

用新鲜草莓测试 CS/GEL/TP 复合膜抑制腐烂的功效。选择大小、成熟度相似的草莓随机分配成 4 份，每组放入相同个数，包括空白组、市售 PE 膜组、CS/GEL 复合膜组和 CS/GEL/TP 复合膜组。将草莓放入食品级保鲜盒并用各组膜覆盖，避免与外界环境直接接触。将上述 4 组样品在室温(25 ℃±2 ℃)下保存，贮存期间每天取出拍照、称重。

(1)重量损失率。测定不同组处理的草莓储存过程中的重量变化，将草莓的初始重量 m_0 与每次测量的重量 m 之差定义为草莓的重量损失率，按初始重量损失的百分比计算[16]。重量损失率按公式(5)计算:

$$重量损失率/\%=\frac{m_0-m}{m_0}\times 100\% \quad (5)$$

式中: m_0 表示草莓初始重量, g; m 为草莓后续测量的重量, g。

(2)感官质量评价。贮藏期间每天取样进行感官质量评价，参考黄益飞等[17]的感官评分标准。由 10 名受过专业培训的人员进行感官质量评估。根据产品色泽、气味、腐烂程度、形态等 4 项指标对贮藏期间草莓进行感官评定，感官评分总分为 10 分，各项指标所占分值及评定标准如表 1 所示。

表 1 草莓感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for strawberries

色泽	气味	腐烂程度	形态	评分
鲜红色	有新鲜果香味	无腐烂	果实饱满，花萼无萎缩	9~10
较红，部分色泽偏暗	果香味变淡	1 个腐烂点	果实较饱满，花萼边缘卷起，	7~8
暗红	无果香味	2~3 个腐烂点	果实软烂，花萼萎缩	5~6
部分变为褐色	稍有异味	>果实表面积的 1/4	开始霉变腐烂	3~4
变黑	有明显腐烂气味	>果实表面积的 1/2	果实基本腐烂	0~2

1.4　数据处理

采用 Excel 2021 进行数据收集整理，采用 Origin 2021 软件进行绘图，所得试验数据均以平行测定的平均值±标准偏差表示。采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行显著性差异分析。

2　结果与分析

2.1　复合膜颜色与形貌

图 2 观察到了不同 TP 添加量的 CS/Gel/TP 6 种薄膜的良好外观，表面相对平坦、透明和光滑。随着 TP 添加量的增多，复合膜颜色越来越深。这是因为 TP 含有酚羟基结构，具有天然棕褐色或深色特征[18]，添加量越高，颜色越明显。经观察发现，复合膜的覆盖虽导致校徽标志清晰度有所降低，但未对其可见性产生显著影响，标志轮廓及核心信息仍保持可辨识状态。

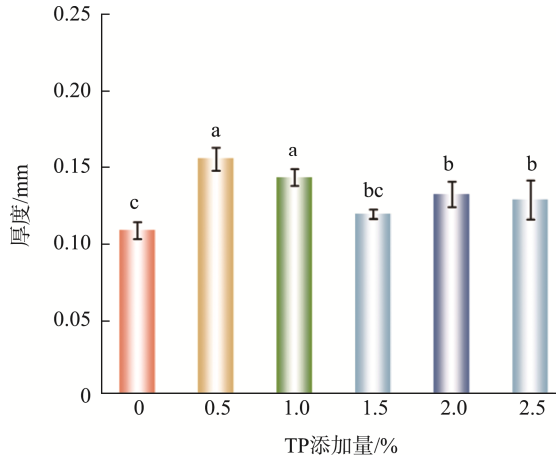


图 2　不同 TP 添加量复合膜的颜色与形貌

Fig.2　Color and morphology of composite films with different TP additions

2.2　复合膜厚度测试

厚度是薄膜的基本指标之一。如图 3 所示，随着 TP 添加量从 0%逐步增加至 2.5%，复合膜的厚度整体呈上升趋势，这与卢俊宇等[19]的研究结果一致。分析表明，与 0%组相比，TP 添加量为 0.5%和 1.0%时厚度显著增加(P<0.05)，两者之间无显著差异；添加量增至 1.5%时厚度有所降低，与 0%无显著差异；添加量为 2.0%和 2.5%时两者厚度无显著差异(P>0.05)，显著高于 0%组，但显著低于 0.5%和 1.0%组(P<0.05)。TP 作为固相添加物，其加入增加了成膜体系的固体含量，因此总体厚度呈上升趋势；而局部波动可能与 TP 在成膜液中的分散均匀性有关，当 TP 添加量较低时(0.5%、1.0%)，颗粒分散较均匀，膜厚度相对稳定；当添加量增加至 1.5%时，TP 可能形成局部聚集体，导致膜厚度出现下降；继续增加至 2.0%、2.5%时，固体含量效应占主导，厚度再次增加。



注：不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。图 4~6、9 同。

图 3　不同 TP 添加量复合膜的厚度(n=3)

Fig.3　Composite films thickness with different TP additions (n=3)

2.3　复合膜含水量、水溶性、溶胀度测试

2.3.1　复合膜含水量测试

耐水性是食品包装的重要性能之一，因为潮湿的环境会破坏包装膜的完整性，加速微生物的生长。如图 4 所示，TP 添加量对复合膜含水量有显著影响。与对照组(0% TP)相比，添加 0.5% TP 时薄膜的含水量略有升高，且差异显著(P<0.05)。当 TP 添加量增至 1.0%时，含水量下降至与对照组无显著差异的水平(P>0.05)。进一步增加 TP 至 1.5%时，含水量降低至各组最低值。TP 添加量为 2.0%和 2.5%时，含水量略有回升，两者无显著差异(P>0.05)，且显著低于对照组和 0.5%组(P<0.05)，但与 1.0%组无显著差异(P>0.05)。低添加量(0.5%)下含水量的轻微升高，可能是由于少量 TP 的酚羟基通过氢键与水分子结合，增加了膜内结合水含量；同时，低浓度 TP 对 CS/GEL 网络结构的交联作用尚不显著，未能有效限制水分子的进入。当 TP 添加量进一步增加时，TP 与 CS、GEL 分子链之间的氢键和疏水相互作用增强，形成更致密的网络结构，从而降低了含水量[20]。高水分含量的薄膜会导致微生物滋生和功能成分流失，但过低的水分含量会影响膜的柔韧性。结果表明，添加 1.5% TP 可显著降低复合膜的含水量(P<0.05)，同时保持适中的质地。

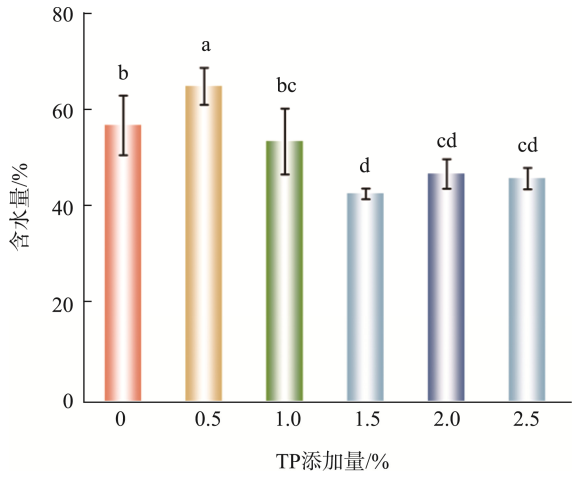


图 4　不同 TP 添加量的复合膜含水量(n=3)

Fig.4　Water content of composite films with different TP additions (n=3)

2.3.2　复合膜水溶性测试

如图 5 所示，TP 添加量对复合膜的水溶性有显著影响。未添加 TP 的对照组水溶性最高，显著高于所有添加

TP 的组。添加 0.5% TP 后，水溶性显著下降。当 TP 添加量增加至 1.0%、1.5%、2.0%和 2.5%时，水溶性略有回升，4 组之间无显著差异(P>0.05)，均显著低于对照组(P<0.05)。这一结果表明，少量 TP (0.5%)即可显著降低复合膜的水溶性；继续增加 TP 用量，水溶性虽有所回升但仍保持在较低水平。这可能是因为低添加量下 TP 与 CS/GEL 形成致密交联网络，降低了水溶性；而添加过多的 TP 会通过改变复合膜的微观结构、引入亲水基团、降低结晶度以及调节局部化学环境，协同促进了水分子与膜材料的相互作用，最终表现为水溶性的提升。

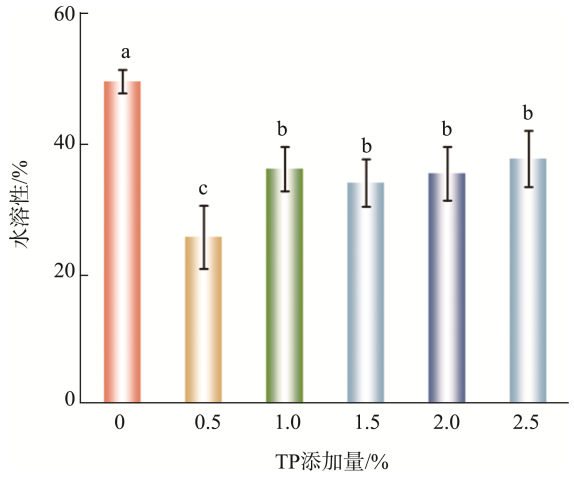


图 5 不同 TP 添加量的复合膜水溶性(n=3)

Fig.5 Water solubility of composite films with different TP additions (n=3)

2.3.3 复合膜溶胀度测试

溶胀度是衡量膜材料耐水性能的关键指标之一，较低的溶胀率意味着薄膜具有更强的阻水能力，从而在食品包装领域能够提供更优异的保护效果。如图 6 所示，TP 添加量对复合膜溶胀度有显著影响(P<0.05)。未添加 TP 的对照组溶胀度最高，显著高于所有添加 TP 的组。添加 0.5% TP 后溶胀度显著下降(P<0.05)。当 TP 添加量增至 1.0%时，溶胀度进一步下降，与 0.5%组差异显著(P<0.05)。1.5% TP 添加量使溶胀度降至最低，显著低于其他所有组(P<0.05)。TP 添加量为 2.0%和 2.5%时，溶胀度略有回升，其中 2.0%组与 1.0%、1.5%、2.5%组均无显著差异(P>0.05)，2.5%组与 1.0%、2.0%组无显著差异(P>0.05)，但都显著高于 1.5%组(P<0.05)。总体而言，添加 TP 能有效降低复合膜的溶胀度，其中 1.5% TP 效果最佳。这可能是由于 TP 中含有疏水性苯环基团，增强了薄膜的疏水性能；同时，CS 分子链上的羟基、氨基等基团与 TP 的酚羟基结合形成氢键，增强了分子间相互作用，提高了复合膜的致密性，从而降低了溶胀率[21]。综合以上分析，CS/GEL/TP 薄膜具有较强的阻隔性和耐水性，是理想的食品保鲜包装膜。

2.4 复合膜透光率测试

薄膜的在 200~800 nm 范围内测量的透射率如图 7 所示。在 400 nm 处，TP 添加量为 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%的复合膜透光率分别为 59.83%、1.017%、0.006%、0.113%、0.006%、0.024%。TP 的添加使薄膜的透光率整体降低，交联与制膜工艺差异导致透光率小幅波动。保护包装食品免受紫外线照射是包装材料的一个重要性能标准，与 CS/GEL 薄膜相比，TP 的加入降低了紫外线区域的透射率，表明复合薄膜表现出更高的紫外线阻隔能力。当 TP 添加量为 1%时，复合膜已经几乎完全屏蔽中波紫外光。结果表明，TP 具有强紫外阻隔作用，原因是多酚类物质中含有的芳香环结构有良好的紫外线吸收能力，随着 TP 添加量的增加，复合膜屏蔽紫外的能力也愈发增强[22]。

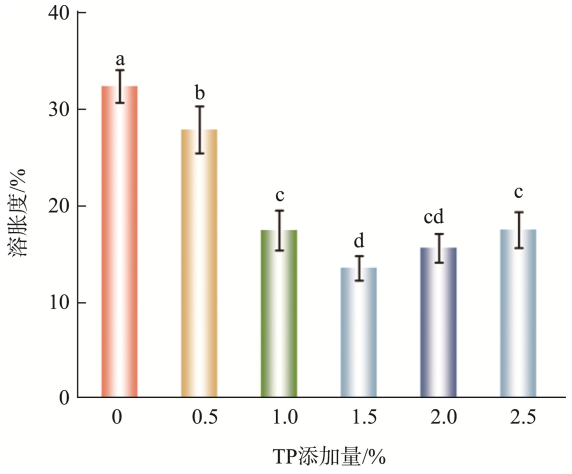


图 6 不同 TP 添加量的复合膜溶胀度(n=3)

Fig.6 Swelling degree of composite films with different TP additions (n=3)

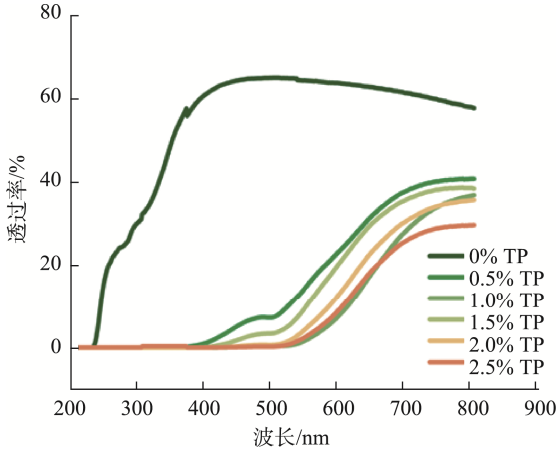


图 7 不同 TP 添加量的复合膜透光率

Fig.7 Light transmittance of composite films with different TP additions

2.5 复合膜抑菌率测试

食品包装材料的抗菌活性对于延长食品保质期具有

重要意义。实验评价了不同 TP 添加量的复合膜对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的抑菌效率, 平板计数结果如图 8 所示, 复合膜对 *E. coli* 和 *S. aureus* 都具有抗菌活性。如图 9 所示, TP 添加量对复合膜的抑菌率有显著影响(P<0.05), 随着 TP 添加量的增加, 抑菌活性随之增强。对 *E. coli* 而言, 0% TP 组抑菌率为 0%, 即 CS/GEL 复合膜基本无抗菌活性, 显著低于所有添加 TP 的组(P<0.05)。添加 0.5% TP 后抑菌率显著上升。TP 添加量为 1.0%、1.5%、2.0%时, 三者之间无显著差异(P>0.05), 但均显著高于 0.5%组(P<0.05)。当 TP 添加量达 2.5%时, 抑菌率最高; 对于 *S. aureus*, 0% TP 组抑菌率为 0%, 与 0.5% TP 组无显著差异(P>0.05)。添加 1.0% TP 后抑菌率显著上升。当 TP 添加量为 1.5%、2.0%、2.5%时, 抑菌率均显著高于 1.0% TP 组, 三者之间无显著差异(P>0.05)。1.5% TP 添加量的复合膜对 *E. coli* 的抑菌率为 73.34%, 对 *S. aureus* 的抑菌率为 99.78%。2.5% TP 添加量的复合膜的抑菌率最高, 对 *E. coli* 的抑菌率为 85.52%, 对 *S. aureus* 的抑菌率为 99.81%。复合膜具有抑菌效果可能是因为酚类化合物可与细胞膜磷脂反应[23], 破坏了细胞膜脂质和蛋白质构象凝集中的细胞通透性[24], 从而破坏了两种菌株的细胞膜并抑制细菌生长。且 TP 对金黄色葡萄球菌有着更强的抑菌活性。这可归因于脂多糖的存在, 脂多糖使后者的细胞壁结构更紧凑, 对 TP 更有抵抗力[25]。许多研究表明, 酚羟基是影响材料抗菌活性的关键因素[26–30], 未添加 TP 的 CS/GEL 复合膜基本无抗菌活性, 而 TP 富含酚羟基, 将其引入到复合膜中后赋予了复合膜良好的抗菌性能。

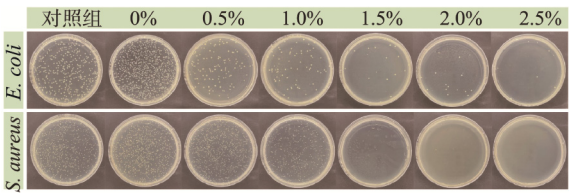


图 8　平板计数实验结果

Fig.8　Results of tablet counting experiment

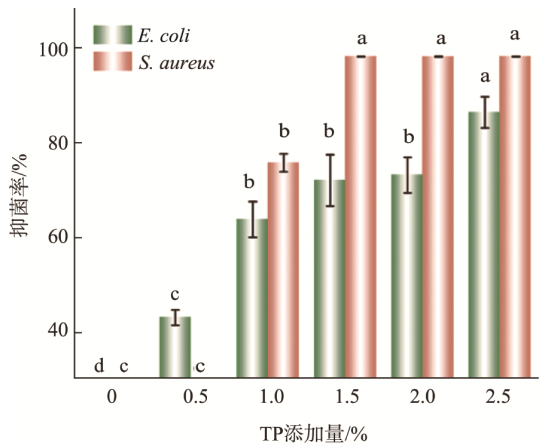


图 9　不同 TP 添加量的复合膜抑菌率(n=3)

Fig.9　Antibacterial rate of composite films with different TP additions (n=3)

2.6　复合膜对草莓保鲜效果的影响

综合上述实验结果, 选择 TP 添加量为 1.5%的复合膜进行草莓保鲜实验。该添加量下复合膜的紫外阻隔和抗菌性能已提升至较高水平, 继续增加 TP 用量性能改善趋缓, 且从成本角度考虑, 1.5%是兼顾性能与经济性的适宜选择。

2.6.1　草莓重量损失率

在贮藏期间, 草莓质量的损失是一种自然现象, 这是因为草莓进行了有氧呼吸, 并且水分的挥发也会造成草莓质量的减轻[31]。贮藏期间, 各处理组草莓的重量损失率均随时间延长而升高(图 10)。在贮藏前 8 d, 市售 PE 膜组的重量损失率始终低于 CS/GEL 组和 CS/GEL/1.5% TP 组, 这归因于 PE 膜优异的水蒸气阻隔性能, 能够有效抑制水分蒸发。然而, 贮藏 8 d 后, PE 膜组的重量损失率快速上升, 至第 11 d 时达到 18.47%, 而 CS/GEL/1.5% TP 组为 15.27%。单因素方差分析表明, 4 组之间无显著差异(P>0.05)。PE 膜虽能阻隔水蒸气, 但也严重阻碍了气体的交换, 导致草莓后期发生无氧呼吸, 加速组织衰老和软化, 进而加剧失重。相比之下, CS/GEL/1.5% TP 复合膜具有一定的透气性, 能维持适宜的气体微环境, 延缓衰老; 同时, TP 的抗菌作用抑制了微生物生长, 减少了后期腐烂导致的额外失重。因此, 从整个贮藏期来看, CS/GEL/1.5% TP 复合膜表现出更优的保鲜效果。

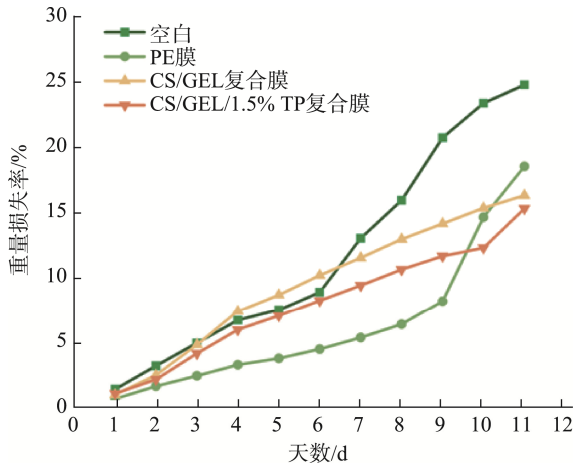


图 10　不同种类保鲜膜对草莓重量损失率的影响

Fig.10　Effects of different types of cling films on the weight loss rate of strawberries

2.6.2　草莓感官评价

草莓形貌变化如图 11 所示, 空白组的草莓从 2 d 开始就出现腐烂点, 4 d 时开始腐烂、花萼枯萎, 8 d 时开始长霉菌、出水、出现异味, 10 d 长了大量霉菌、有明显腐烂气味; 市售 PE 膜组草莓从 4 d 开始出现局部暗红, 8 d 开始腐烂、花萼长了少量霉菌、出现异味, 10 d 长出大量霉菌、有明显腐烂气味; CS/GEL 复合膜组 4 d 出现 2~3 个腐烂点, 8 d 腐烂点变大、花萼长了少量霉菌, 10 d 草莓局部发

霉、出现异味; CS/GEL/1.5%TP 复合组在保鲜实验中效果明显, 6 d 才开始出现 2~3 个腐烂点, 10 d 花萼萎缩、腐烂点增大, 对比其他组保鲜效果明显, 可将草莓贮藏期有效延长 4 d。

草莓在贮藏期间的感官品质变化是评价保鲜效果的直观指标。如图 12 所示, 随着贮藏时间的延长, 所有处理组的草莓感官评分均呈下降趋势。结果表明, 4 组间存在显著差异(P<0.05)。CS/GEL/1.5% TP 复合膜组的感官评分显著高于其他 3 组(P<0.01), CS/GEL 复合膜组显著高于空白组和 PE 膜组(P<0.05), 而空白组与 PE 膜组之间无显著差异(P>0.05)。结合图 11 的草莓形貌变化照片, CS/GEL/1.5% TP 复合膜包装的草莓在第 10 d 仍保持较好的色泽和形态, 腐烂程度明显低于其他处理组。这主要归因于环境微生物在草莓表面的快速繁殖, 导致腐烂、霉变等感官劣变。而经 CS/GEL/1.5% TP 复合膜包装的草莓在整个贮藏期内始终保持最高的感官评分值。结合复合膜的体外抑菌实验结果(图 9), 表明复合膜能够有效抑制草莓表面微生物的生长繁殖, 从而延缓腐烂、保持感官品质, 表现出最优的保鲜效果。

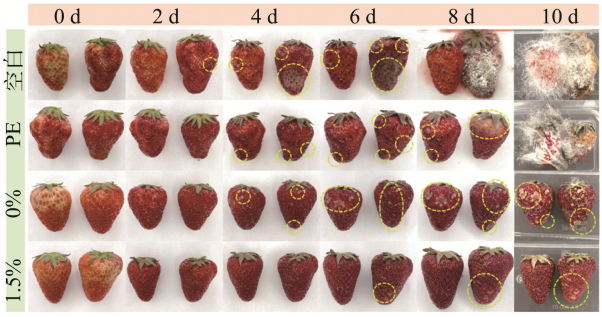
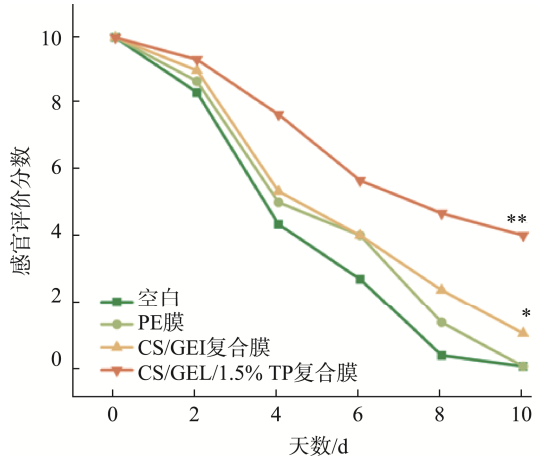


图 11 草莓贮藏期间形貌变化

Fig.11 Morphological changes of strawberry during storage



注: *表示贮藏第 10 d 时组间具有显著性差异(P<0.05), **表示贮藏第 10 d 时组间具有极显著性差异(P<0.01)。

图 12 不同种类保鲜膜对草莓感官评价的影响

Fig.12 Effects of different types of cling films on sensory evaluation of strawberry

3 结 论

本研究制备了不同 TP 添加量的 CS/GEL 复合膜, 并对其各项性能进行了系统研究。结果表明: TP 与 CS、GEL 具有良好的成膜性, 所制备的复合膜表面平整且结构紧密。此外, TP 的加入, 降低了复合膜的含水量、水溶性、溶胀率及紫外可见光透过率。实验表明, TP 添加量为 1.5% 时复合膜的综合性能最好, 紫外光屏蔽性能显著增强, 紫外光透光率低至 0.113%; CS/GEL/1.5% TP 复合膜抑菌效果好, 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别为 73.34%和 99.78%; 在保鲜实验中, 覆 CS/GEL/1.5% TP 复合膜组的草莓感官评定结果最优, 且草莓重量损失率最低, 有效延长草莓贮存期 4 d。实验表明 CS/GEL/1.5% TP 复合膜对草莓保鲜具有良好的应用效果, 可延长草莓的货架期, 提高贮藏期间的感官品质。

参考文献

[1] 刘星凯, 任菲, 王书军. 淀粉基抗菌食品包装膜的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 1–9.
Liu Xingkai, Ren Fei, Wang Shujun. Advances in starch-based antibacterial food packaging films [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 1–9.

[2] 赵益华, 贾凯悦, 季民, 等. 壳聚糖改性硅藻土除藻性能及生态安全性评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2441–2448.
Zhao Yihua, Jia Kaiyue, Ji Min, et al. Algae removal performance and ecological safety evaluation of diatomite modified by chitosan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2441–2448.

[3] Wang Qiyang, Tang Yaqi, Ke Qinfei, et al. Magnetic lanthanum-doped hydroxyapatite/chitosan scaffolds with endogenous stem cell-recruiting and immunomodulatory properties for bone regeneration [J]. Journal of Materials Chemistry. B, 2020, 8(24): 5280–5292.

[4] Haghighi H, Licciardello F, Fava P, et al. Recent advances on chitosan-based films for sustainable food packaging applications [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100551.

[5] 李泽民, 何生林, 丁云桥, 等. 五因素混水平正交实验优化鱼鳞胶原提取工艺[J]. 山东化工, 2019, 48(20): 18–22, 24.
Li Zemin, He Shenglin, Ding Yunqiao, et al. Optimization of collagen extraction from fish scale by five-factor mixed horizontal orthogonal experiments [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(20): 18–22, 24.

[6] Zhi Y, Chaieb S, Hemar Y. Gelatin-based nanocomposites: a review [J]. Polymer Reviews, 2021, 61(4): 765–813.

[7] Khan M R, Sadiq M B. Importance of gelatin, nanoparticles and their interactions in the formulation of biodegradable composite films: a review [J]. Polymer Bulletin, 2021, 78(7): 4047–4073.

[8] Cao Wenling, Yan Jianghao, Liu Chun, et al. Preparation and characterization of catechol-grafted chitosan/gelatin/modified chitosan-AgNP blend films [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116643.

[9] Wang Shancan, Li Mingyu, He Beibei, et al. Composite films of sodium alginate and konjac glucomannan incorporated with tea polyphenols for food preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules,

2023, 242(Pt 1): 124732.

[10] Chen Zhanpeng, Liu Ren, Wei Yuting, et al. A novel strategy to transform mango peel waste into useful product–Preparing antibacterial film containing tea polyphenols for chicken breast preservation [J]. LWT, 2024, 197: 115933.

[11] 郭丛珊, 张丽叶. 含茶多酚大豆分离蛋白抗菌膜的制备及其性能和保鲜效果[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2011, 38(4): 104–109.
Guo Congshan, Zhang Liye. Properties and preservation effect of tea polyphenol-incorporated soy protein isolate antibacterial films [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2011, 38(4): 104–109.

[12] 郑燕, 王笑, 代楚涓, 等. 壳聚糖/羧甲基纤维素/茶多酚抗氧化复合膜的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(增刊 1): 59–65.
Zheng Yan, Wang Xiao, Dai Chujuan, et al. Preparation and properties of chitosan/carboxymethyl cellulose/tea polyphenol antioxidant composite membrane [J]. China Plastics Industry, 2021, 49(S1): 59–65.

[13] 张立挺, 蒋子文, 高磊, 等. 壳聚糖明胶可食用复合膜的制备与抗菌性能研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 106–111, 180.
Zhang Liting, Jiang Ziwen, Gao Lei, et al. Preparation and antimicrobial properties of the edible food packaging film composited by chitosan and gelatin [J]. Food Research and Development, 2020, 41(6): 106–111, 180.

[14] 李双健, 邸清茹, 龚敏慧, 等. 壳聚糖/玉米醇溶蛋白-花色苷纳米颗粒复合膜的制备及其性能[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 213–222.
Li Shuangjian, Di Qingru, Gong Minhui, et al. Preparation and characterization of chitosan/zein-anthocyanin nanoparticles composite film [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 213–222.

[15] Liu Xiaoli, Sun Tianyu, Wang Xiaoqing, et al. Development of recyclable polyvinyl alcohol-based transparent films with enhanced UV shielding for sustainable fruit preservation packaging [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 50: 101553.

[16] Zhao Meiyan, Zhang Zhikun, Cai Hong, et al. Controlled moisture permeability of thermoplastic starch/polylactic acid/poly butylene adipate-co-terephthalate film for the autolysis of straw mushroom Volvariella volvacea [J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt A): 131409.

[17] 黄益飞, 曾逸彬, 叶芳哲, 等. 聚乙烯醇/明胶/茶多酚复合膜的制备及草莓保鲜性能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 254–261.
Huang Yifei, Zeng Yibin, Ye Fangzhe, et al. Preparation and strawberry preservation performance of polyvinyl alcohol/gelatin/tea polyphenol composite films [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 254–261.

[18] 刘荣钦. 高强度壳聚糖茶多酚-肉桂醛复合膜的制备及其在冷鲜猪肉保鲜中的应用[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2024: 15-18.
Liu Rongqin. Preparation of high strength chitosan tea polyphenol-cinnamaldehyde composite films and their application in chilled pork [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2024: 15-18.

[19] 卢俊宇, 朱芮, 吴贺君, 等. 茶多酚对可食性马铃薯淀粉/海藻酸钠复合膜性能影响及表征[J]. 核农学报, 2020, 34(10): 2226–2234.
Lu Junyu, Zhu Rui, Wu Hejun, et al. Effect of tea polyphenols on the properties of edible potato starch/sodium alginate composite films [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(10): 2226–2234.

[20] 高艳阳, 赖仰洲, 李昭昭, 等. 基于茶多酚的壳聚糖基抗氧化复合膜的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(6): 178–180, 183.
Gao Yanyang, Lai Yangzhou, Li Zhaozhao, et al. Study on the preparation and performance of chitosan matrix antioxidant composite film based on tea polyphenol [J]. New Chemical Materials, 2016, 44(6): 178–180, 183.

[21] 俞杨销, 宋功吉, 张子凡, 等. 壳聚糖/明胶/茶多酚复合膜的溶胀溶失性能[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(1): 70–77.
Yu Yangxiao, Song Gongji, Zhang Zifan, et al. Study on the swelling and weight loss of chitosan/gelatin/tea polyphenol composite film [J]. Advanced Textile Technology, 2022, 30(1): 70–77.

[22] 海芳. 牛干灰皮胶原纤维基抗菌抗氧化可食用包装膜的制备及性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023: 9-13..
Hai Fang. Study on preparation and properties of edible packaging films with antibacterial and antioxidant functions based on dried bovine-limed hide fibers [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2023: 9-13.

[23] Zhang Liming, Yu Dawei, Gu Yulu, et al. Green halochromic smart and active packaging materials based on chitosan film loading nanoparticles: functionality, physicochemical properties and application [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109667.

[24] Wang Wei, Chen Yinfeng, Wei Zefeng, et al. Microemulsion of cinnamon essential oil formulated with tea polyphenols, Gallic acid, and tween 80: antimicrobial properties, stability and mechanism of action [J]. Microorganisms, 2022, 11(1): 2.

[25] Chen Xiaoqiang, Chen Tingting, Liu Jiayan, et al. Physicochemical stability and antibacterial mechanism of theabrownins prepared from tea polyphenols catalyzed by polyphenol oxidase and peroxidase [J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(1): 47–61.

[26] Xu Yinghong, Zeng Peng, Li Mingfei, et al. γ-Valerolactone/water system for lignin fractionation to enhance antibacterial and antioxidant capacities [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 279: 119780.

[27] Zhao Lei, Zhou Ya, Yue Weiguo, et al. Natural phenolics as multitarget antimicrobials for food preservation: mechanisms of action [J]. Food Chemistry, 2025, 31: 103056.

[28] Liu Jinbo, Chen Xiao, Li Saiya, et al. Exploring the antimicrobial mechanisms of flavonoids with phenolic hydroxyl groups: implications for novel wound dressings [J]. Industrial Crops and Products, 2026, 239: 122400.

[29] [29] Shi Xiaolin, Yang Wei, Liu Bo, et al. Hydroxyl density-dependent silver nanoparticle formation from star-shaped polyphenols enables antibacterial, anti-inflammatory, and antioxidant therapy of diabetic wounds [J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 530: 173465.

[30] Zhu Meiyan, Sha Jia, Zhu Liang, et al. Preparation of safe and highly photothermal antibacterial passion fruit peel extract/polydopamine nanoparticles to be incorporated into HPMC films for food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 348: 150801.

[31] 吴若寒, 曹立妤, 孙芸, 等. 羧甲基壳聚糖/醛化羧甲基纤维素聚合物的制备及其在草莓保鲜中的应用[J]. 生物加工过程, 2023, 21(6): 702–708.
Wu Ruohan, Cao Liyu, Sun Yun, et al. Preparation of carboxymethyl chitosan/aldehyde carboxymethyl cellulose polymer and its application in strawberry preservation [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2023, 21(6): 702–708.

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)