

# 芳樟醇/ $\gamma$ -环糊精包合物的制备表征及其在草莓保鲜中的应用

权楚尧, 吴晶澍, 臧佳辰\*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 芳樟醇是一种天然挥发性香气成分, 且有一定的抑菌和保鲜作用, 但挥发性强、水溶性差, 限制了它的应用。为了充分发挥芳樟醇的抑菌保鲜作用及拓展其应用范围, 本研究制备了不同芯壁比的芳樟醇/ $\gamma$ -环糊精 ( $\gamma$ -Cyclodextrin,  $\gamma$ -CD) 包合物, 通过紫外分光光度法测定装载量, 采用傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、X-射线衍射分析 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 表征了其结构, 进一步制备含不同比例包合物的可食性保鲜膜, 测定其水蒸气透过系数、溶解率和力学性能, 并以草莓为对象开展常温保鲜试验。结果表明, 芯壁比为 1:4 时包合物装载量最高, 为 11.84%; FTIR、XRD 和 SEM 实验结果表明芳樟醇成功进入  $\gamma$ -CD 疏水空腔并形成新包合结构。添加 0.6 wt.% 包合物的复合膜综合性能较优, 抗拉强度为 33.18 MPa, 水蒸气透过系数降至  $1.26 \text{ g mm m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ 。该处理可显著降低草莓腐烂率和腐烂指数 ( $P<0.05$ ), 延缓硬度下降、质量损失及可溶性固形物和可滴定酸消耗。综上, 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物可提高芳樟醇稳定性, 并增强复合膜的保鲜效果, 为功能型草莓保鲜材料开发提供参考。

**关键词:** 芳樟醇;  $\gamma$ -环糊精; 包合物; 可食性保鲜膜; 草莓保鲜

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.12.0828

## Preparation, Characterization of Linalool/ $\gamma$ -Cyclodextrin Inclusion Complex and Its Application in Strawberry Fresh-Keeping

QUAN Chuyao, WU Jinshu, ZANG Jiachen\*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Linalool is a natural volatile aromatic compound with certain antibacterial and preservative effects. However, its strong volatility and poor water solubility limit its application. To fully utilize the antibacterial and preservative properties of linalool and expand its application scope, this study prepared linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin ( $\gamma$ -CD) inclusion complexes with different core-wall ratios. The encapsulation efficiency (EE) and loading capacity (LC) were determined by UV spectrophotometry, and structural characterization was conducted by FTIR, XRD and SEM. Further, edible preservative films containing varying proportions of the inclusion complexes were prepared, and their water vapor transmission coefficient, dissolution rate, and mechanical properties were measured. Strawberry preservation tests were conducted at room temperature. The results showed that the highest loading capacity of 11.84% was achieved at a core-wall ratio of 1:4. Analysis using FTIR, XRD and SEM showed that linalool successfully entered the hydrophobic cavity of  $\gamma$ -CD and formed a new inclusion structure. The composite film with 0.6 wt.% inclusion complex exhibited optimal comprehensive performance, with a tensile strength of 33.18 MPa and a reduced water vapor transmission coefficient of  $1.26 \text{ g mm m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ . This treatment significantly decreased the decay rate and decay index of strawberries ( $P<0.05$ ), delayed hardness loss, mass loss, and the consumption of soluble solids and titratable acid. In summary, the linalool/ $\gamma$ -CD inclusion complex enhanced the stability of linalool. The composite film proposed in this study has demonstrated immense potential for application in strawberry preservation.

**Key words:** linalool;  $\gamma$ -cyclodextrin; inclusion complex; edible coating film; strawberry preservation

水果采后仍保持呼吸代谢、蒸腾和成熟衰老等生命活动, 贮运销售阶段易发生果肉软化、营养流失、风味劣

收稿日期: 2026-05-31; 修回日期: 2026-07-06; 接受日期: 2026-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFF1106600); 大学生创新创业项目 (X2025100190498)

作者简介: 权楚尧 (2004-), 男, 本科生, 研究方向: 食品科学与营养工程, E-mail: qcy@cau.edu.cn

通讯作者: 臧佳辰 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食源功能性成分的综合利用, E-mail: zangjiachen@cau.edu.cn

变与微生物霉变,大幅损耗果品商品价值。草莓果皮薄、含水量高、果肉柔嫩,属于极不耐贮的浆果,常温环境下极易失水软烂。同时,草莓采后易受机械损伤和病原微生物侵染,其中灰霉病等病害是造成其货架期缩短和商品价值下降的重要原因<sup>[1,2]</sup>。因此,如何在不影响食用品质的前提下延缓草莓腐败变质,是水果采后保鲜研究中的重要问题。可食用涂膜能够在果实表面形成连续保护层,减少水分散失和气体交换,从而在一定程度上延缓果蔬失水、软化和腐败<sup>[3]</sup>。但单一膜基材主要发挥物理阻隔作用,对病原微生物侵染及腐败进程的抑制能力有限。因此,将天然活性成分引入可食性保鲜膜体系,构建兼具阻隔性能和活性保护作用的复合保鲜膜,是提升保鲜效果的重要途径。

芳樟醇是一种天然单萜醇类挥发性香气成分,广泛存在于薰衣草、罗勒、香樟等植物精油中,被美国食品药品监督管理局认定为一般公认安全物质,具有较好的食品应用安全基础<sup>[4]</sup>。已有研究表明,芳樟醇具有一定镇静舒缓作用<sup>[5]</sup>,同时对草莓采后腐败相关病原菌具有抑制潜力<sup>[6]</sup>,在果蔬保鲜领域具有应用价值。故将芳樟醇引入草莓可食性涂膜体系,不仅可赋予膜材料一定香气特征,也有望利用其活性作用延缓草莓采后腐败。

然而,芳樟醇挥发性强、水溶性差,直接添加于水基成膜体系时易挥发,难以均匀分散并持续发挥作用。环糊精包埋技术可有效改善这一问题。环糊精具有“外亲水、内疏水”的空腔结构,可通过非共价相互作用包埋疏水性小分子,从而改善客体分子的分散性、稳定性和释放特性。其中, $\gamma$ -CD空腔尺寸较大,适合包埋多种香气及活性成分<sup>[7]</sup>,且安全性较高,适用于食品相关体系。因此,利用 $\gamma$ -CD包合芳樟醇,有望降低芳樟醇挥发损失,提高其在水基成膜体系中的分散稳定性,并使其在草莓贮藏过程中逐步释放,从而更充分地发挥保鲜作用。

基于此,本研究以芳樟醇为芯材、 $\gamma$ -CD为壁材制备芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物,并将其引入可食性保鲜膜体系,构建芳樟醇缓释型可食性保鲜膜。通过装载量、傅里叶红外光谱、X-射线衍射和扫描电镜分析包合物形成情况,并评价包合物添加对膜水蒸气阻隔性能、溶解率和力学性能的影响。在此基础上,以草莓为保鲜对象,考察该涂膜对草莓常温贮藏期间腐烂率、腐烂指数、硬度、质量损失率、可溶性固形物、pH值和可滴定酸含量的影响,以期芳樟醇缓释型可食性保鲜膜的开发及其在草莓采后保鲜中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与试剂

$\gamma$ -环糊精(纯度98.00 wt.%),上海源叶生物科技有限公司;芳樟醇(纯度 $\geq 98\%$ ),上海麦克林生化科技有限公司;溴化钾(光谱纯),国药集团化学试剂有限公司;燕麦 $\beta$ -葡聚糖(纯度98 wt.%,食品级,500 g/袋),山西南坝生物科技有限公司;甘油(分析纯),北京百瑞极生物科技有限公司;无水乙醇(分析纯),现代东方(北京)科技发展有限公司;氢氧化钠(分析纯),北京索莱宝生物科技有限公司。

红颜草莓(采收于2026年4月)购自北京市物美超市(学清路店)。

### 1.2 仪器与设备

UV-2550全波长扫描紫外-可见分光光度计,日本Shimadzu Corporation公司;Nicolet iS10傅里叶变换红外光谱仪,美国Thermo Fisher Scientific公司;D8 Advance X射线衍射仪,德国Bruker公司;MC1000喷金仪,日本Hitachi公司;SU8020冷场发射扫描电子显微镜,日本Hitachi公司;BY-R20型高速离心机,北京白洋医疗器械有限公司;LGJ-12普通型真空冷冻干燥机,北京松源华兴科技发展有限公司;KQ5200DE超声波水浴仪,昆山市超声仪器有限公司;T18 ULTRA-TURRAX高速均质机,德国IKA公司;S210-S pH计,梅特勒-托利多仪器有限公司;BS124S电子分析天平,德国Sartorius公司;HH-4J恒温水浴锅,常州恩谊仪器制造有限公司;DHG-9240A电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;GL-5250C磁力搅拌器,海门市林贝尔仪器制造有限公司;GY-2果实硬度计,温州韦度量具仪器有限公司;PAL-1高精度糖度计,日本AGATO公司;YP-2红外粉末压片机,天津诺雷信达科技有限公司;10 mL聚四氟酸碱通用滴定管,常德比克曼生物科技有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物的制备及基本性质测定

##### 1.3.1.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物及物理混合物的制备

芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的制备参照侯文菁的研究<sup>[8]</sup>, 采用水溶液搅拌法。首先, 将  $\gamma$ -CD (10 wt.%) 添加到去离子水中, 室温 (25 °C) 下搅拌直至完全溶解。然后, 将芳樟醇分别按照芯壁质量比为 1:2, 1:4, 1:6, 1:8 缓慢滴加入 10 wt.%  $\gamma$ -CD 水溶液中, 持续搅拌 4 h, 使其充分反应。接着, 8 000 r min<sup>-1</sup> 条件下离心 15 min, 弃去上清液, 留下包合物沉淀。使用无水乙醇洗涤包合物三次, 除去附着在表面的芳樟醇。使用去离子水复溶包合物, 将包合物置于 -20 °C 冰箱冷冻 24 h, 取出后在 -50 °C 冷冻干燥机中干燥 24 h, 得到纯净的芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物粉末。将制备的包合物粉末收集在密封袋中并置于实验室阴凉干燥处保存, 待下一步分析研究。

物理混合物采用物理研磨法制备。分别取摩尔比为 1:1 的  $\gamma$ -CD 和芳樟醇置于研钵中, 使用研杵轻轻研磨混合 (禁止过度研磨, 避免芳樟醇和  $\gamma$ -CD 发生包合), 得物理混合物。

### 1.3.1.2 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物装载量测定

参照 Kou 等<sup>[9]</sup>的研究, 芳樟醇的乙醇溶液的最大吸收波长为 201 nm。因此, 可使用比色法测定芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的装载量。

绘制芳樟醇的标准曲线: 准确称取 168 mg 的芳樟醇置于 100 mL 容量瓶中, 用无水乙醇稀释至刻度处, 作为母液。再从母液中分别移取 1 mL、750、500、250  $\mu$ L 溶液加入 100 mL 容量瓶中, 用无水乙醇定容, 配置成质量浓度为 16.80、12.60、8.40、4.20 mg L<sup>-1</sup> 一系列浓度梯度的标准溶液。将无水乙醇作为参比溶液, 在  $\lambda$ =201 nm 处分别测定上述 4 种标准溶液的吸光度。绘制标准曲线, 以芳樟醇标准溶液的质量浓度为 x 轴, 吸光度为 y 轴, 做线性拟合, 最终确定芳樟醇的标准曲线。

测定包合物的装载率: 称取 100 mg 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物, 溶于 10 mL 无水乙醇密封, 置超声波水浴中 10 min, 使包合物破碎, 芳樟醇释放并被萃取到无水乙醇之中。将该液体在 10 000 r min<sup>-1</sup> 条件下离心 15 min, 用 0.45  $\mu$ m 微孔膜过滤, 取上清液, 适当稀释后, 用紫外可见分光光度计测定溶液在最大吸收波长 201 nm 处的吸光度。根据之前绘制的芳樟醇标准曲线计算出包合物中芳樟醇的含量。

包合物的装载量测定公式如下:

$$\eta = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

式中:

$\eta$ ——包合物的装载量, %;

$m_1$ ——包合物中芳樟醇的质量, g;

$m_2$ ——包合物的总质量, g。

### 1.3.1.3 傅里叶红外光谱分析

傅里叶红外光谱分析按照 Zhang 等<sup>[10]</sup>的方法进行。将  $\gamma$ -CD、芳樟醇和芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物与溴化钾充分混合, 并研磨成粉末, 放在磨具中压制成片。使用 Nicolet iS10 FTIR 光谱仪 (美国 Thermo Fisher Scientific) 在 4 000~400 cm<sup>-1</sup> 的波长范围内扫描检测, 扫描次数 40 次, 分辨率为 2 cm<sup>-1</sup>。

### 1.3.1.4 X-射线衍射分析

X-射线衍射分析按照吴传超等<sup>[11]</sup>的方法进行。利用铜 K $\alpha$  辐射, 使用 D8 Advance X 射线衍射仪 (德国 Bruker) 对  $\gamma$ -CD、芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物粉末和芳樟醇/ $\gamma$ -CD 物理混合物进行 X-射线衍射测定, 扫描角度范围 3°~50°; 扫描速率为 0.5 °min<sup>-1</sup>, 步长为 0.02°。

### 1.3.1.5 扫描电镜

取干燥芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物, 均匀粘附于导电胶样品台, 经 Hitachi MC1000 喷金处理后, 采用 Hitachi SU8020 冷场发射扫描电镜观察微观形貌, 加速电压 5 kV, 采集二次电子 (SE) 图像。

## 1.3.2 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物可食性保鲜膜的制备及膜性质测定

### 1.3.2.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物可食性保鲜膜的制备

按照 1.3.1 节方法制备芯壁比为 1:4 的芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物备用。可食性保鲜膜的制作方法参照 Lin 等<sup>[12]</sup>的研究。将  $\beta$ -燕麦葡聚糖在 90 °C 水浴加热条件下溶于去离子水中, 制成含量为 2% 的溶液。随后, 加入体积分数为 1% 的甘油, 继续搅拌 30 min。待成膜液温度为 35 °C 后, 分别加入质量分数 (以成膜液总质量计) 为 0 wt.%、0.2 wt.%、0.4 wt.%、0.6 wt.%、0.8 wt.% 的芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物, 持续搅拌 30 min。随后使用 Ultra Turrax® T18 均质器 (IKA,

德国) 在  $8\,000\text{ r min}^{-1}$  下均质化, 持续 2 分钟, 然后放置以进行除泡。将制好的成膜液倒置在 90 mm 的培养皿中, 烘箱  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  干燥 12 h 并揭膜。

### 1.3.2.2 可食性保鲜膜的水蒸气透过系数及溶解率测定

首先, 测量膜的厚度, 在可食性保鲜膜无折痕情况下, 在距样品纵向端部 1 cm 的位置, 沿横向截取 5 个试样点, 使用高精度千分尺测量<sup>[13]</sup>。可食性保鲜膜的水蒸气透过系数测定方法按照秦琛强等<sup>[14]</sup>的研究。向小烧杯中加入适量变色硅胶, 采用待测可食用膜密封烧杯瓶口, 将样品置于温度  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 84.3% RH 的环境中恒温放置 24 h, 通过称量法测定硅胶吸湿后的质量变化, 记录硅胶质量增加值。膜水蒸气透过系数 (WVP) 按式 (2) 计算。

$$\text{WVP} = \frac{\Delta m \times L}{A \times t \times \Delta P} \quad (2)$$

式中:

$\Delta m$ ——硅胶质量差值, g;

$L$ ——膜厚度, mm;

$A$ ——膜面积,  $\text{m}^2$ ;

$t$ ——时间, d;

$\Delta P$ ——膜上下压力差, kPa。

膜溶解率测定方法参照张伟等<sup>[15]</sup>的研究。称取约 0.2 g 可食性保鲜膜, 加入 20 mL 蒸馏水使其充分溶解, 密封静置 24 h 后, 使用滤纸进行过滤。而后将滤纸和不溶物放入烘箱中干燥 24 h。用电子天平称取滤纸质量和烘干物总质量。膜溶解率按式 (3) 计算。

$$M = \frac{m_3 - (m_4 - m_5)}{m_3} \times 100 \quad (3)$$

式中:

$M$ ——膜溶解率, wt.%;

$m_3$ ——称取膜质量, g;

$m_4$ ——烘干物总质量, g;

$m_5$ ——滤纸质量, g。

### 1.3.2.3 可食性保鲜膜的抗拉强度和延伸率测定

可食性保鲜膜的抗拉强度和延伸率测定参照尹国友等<sup>[16]</sup>的研究。将可食性保鲜膜裁成长 50 mm、宽 15 mm 的长条, 采用质构仪测定, 测试条件为: 称重传感器为 25 N; 探头: A/MTG; 初始夹距: 20 mm; 拉伸速率:  $2\text{ mm s}^{-1}$ 。可食性保鲜膜的抗拉强度和延伸率分别按式 (4)、(5) 计算。

$$R = \frac{F}{L \times W} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (5)$$

式中:

$R$ ——抗拉强度, MPa;

$F$ ——最大拉力, N;

$L$ ——膜厚度, m;

$W$ ——膜宽度, m;

$\delta$ ——延伸率, %;

$L_0$ ——拉伸前长度, m;

$L_1$ ——拉伸后长度, m。

## 1.3.3 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 可食性保鲜膜在草莓保鲜中的应用

1.3.3.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 可食性保鲜膜的草莓涂膜处理

首先，按照 1.3.1 节方法制备添加芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物为 0 wt.%和 0.6 wt.%的涂膜液。然后挑选无腐烂病害、无机械损伤、大小、成熟度均一的草莓（草莓之前未经保鲜处理）进行实验。将草莓随机分为 3 组，每个处理组使用 20 个草莓。将实验草莓样品在 0.6 wt.%包合物含量涂膜液、不含包合物的对照涂膜液中浸泡 30 s 并自然晾干，置于室温 20~25 ℃下贮藏，每隔 1 d 测定草莓的品质指标变化情况。以无处理组草莓为空白对照，每组实验重复 3 次。

1.3.3.2 草莓贮藏期间腐烂率测定

草莓的腐烂率测定按照宋淑红等<sup>[17]</sup>的研究进行测定，根据草莓的腐烂情况，将草莓分为五个等级（表 1）。每天，记录草莓的腐烂等级和腐烂个数，腐烂率和腐烂等级按照下式（6）、（7）计算。

$$p = \frac{N_1}{N_0} \times 100 \tag{6}$$

$$K = \sum \frac{g_i \times d_i}{g_5 \times N_0} \tag{7}$$

式中：  
 $p$ ——腐烂率，%；  
 $N_1$ ——腐烂数量，个；  
 $N_0$ ——草莓总数量，个；  
 $K$ ——腐烂指数，%；  
 $g_i$ ——腐烂等级；  
 $d_i$ ——腐烂等级所对应数量，个；  
 $g_5$ ——最高腐烂等级。

表 1 草莓腐烂等级  
Table 1 Rot rating of strawberry

| 等级 | 标准           |
|----|--------------|
| 0  | 无腐烂          |
| 1  | 腐烂面积<10%     |
| 2  | 腐烂面积 10%~30% |
| 3  | 腐烂面积 31%~50% |
| 4  | 腐烂面积>50%     |

1.3.3.3 草莓贮藏期间硬度、质量损失率和可溶性固形物含量测定

草莓贮藏期间的硬度采用果实硬度计进行测定，每组随机选取 3 颗草莓，在果实赤道部位对称两点测定，探头直径 5 mm，测定深度 10 mm，记录硬度值，取平均值作为该组果实硬度<sup>[18]</sup>。草莓贮藏期间的质量损失率使用量差法测定，按式（8）进行计算。

$$W = \frac{m_6 - m_7}{m_6} \tag{8}$$

式中：  
 $W$ ——质量损失率，%；  
 $m_6$ ——储存前质量，g；  
 $m_7$ ——测定时质量，g。

草莓贮藏期间的可溶性固形物含量采用数显折射仪测定。取草莓果肉挤出汁液，滴于数显折射仪棱镜表面，读取白利度，每组重复 3 次，取平均值。可溶性固形物含量用白利度表示。

1.3.3.4 草莓贮藏期间 pH 值和可滴定酸含量测定

草莓使用研钵研磨后,用纱布过滤得到草莓汁液,使用 pH 计测定草莓样液 pH 值。称取 10.0 g 草莓果肉,加 100 mL 去离子水研磨提取,过滤后取 20 mL 滤液,以  $0.1 \text{ mol L}^{-1}$  NaOH 标准溶液滴定至滴定终点,将 pH 值为 8.2 作为滴定终点,记录消耗 NaOH 溶液的体积。可滴定酸含量(以柠檬酸计)按式(9)计算。

$$T = \frac{c \times (V_1 - V_2) \times k \times n}{m} \times 100 \quad (9)$$

式中:

$T$ ——可滴定酸含量, wt.%;

$c$ ——氢氧化钠浓度, ( $\text{mol L}^{-1}$ );

$V_1$ ——滴定样液消耗氢氧化钠体积, mL;

$V_2$ ——空白滴定消耗氢氧化钠体积, mL;

$k$ ——柠檬酸的换算系数(0.064);

$n$ ——样液稀释倍数;

$m$ ——样品质量, g。

## 1.4 数据处理

使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行数据分析,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,采用 LSD 进行差异显著性分析,显著性水平  $P=0.05$ 。图像绘制使用 Origin 2024 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物性质分析

#### 2.1.1 装载量测定

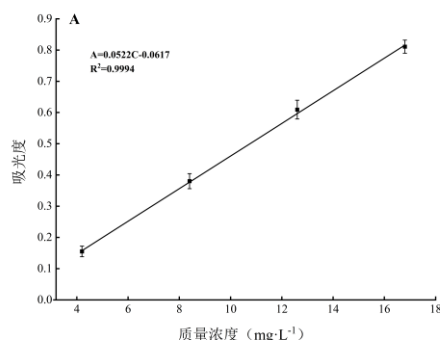


图 1 芳樟醇标准曲线

Fig.1 Standard curve of linalool

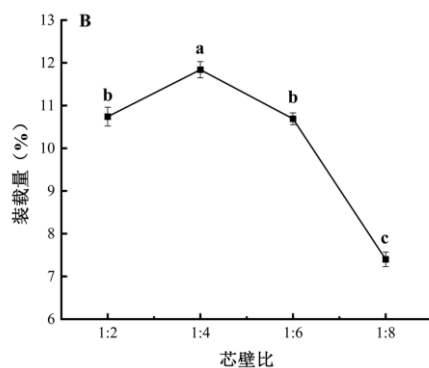


图 2 芯壁比对芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物装载量的影响

Fig.2 The effect of core-wall ratio on the loading capacity of linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex

注: 图中不同小写字母表示组间差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

准确测定芯材的包埋含量是评估主客体包合体系效能的基础。为实现芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物中芳樟醇含量的精确定量,本研究首先建立了芳樟醇的标准曲线。如图 1,得标准曲线方程为  $A=0.052\ 2C-0.061\ 7$  ( $R^2=0.999\ 4$ ,  $C$  为标准溶液质量浓度,  $\text{mg L}^{-1}$ )。芳樟醇在  $4.20\sim 16.80\ \text{mg L}^{-1}$  范围内线性关系良好 ( $R^2>0.999$ ),可用于芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物中芳樟醇含量的定量测定。

在此基础上,进一步考察了芯壁比对装载量的影响。装载量作为评价包合效果的核心指标,直接反映了壁材  $\gamma$ -CD 对芯材芳樟醇的富集与负载能力。不同芯壁比(芳樟醇: $\gamma$ -CD,质量比)对包合物装载量的影响见图 2。由图 2 可知,芯壁比对包合物装载量具有显著影响:当芯壁比由 1:2 增至 1:4 时,装载量由 10.73%增加至 11.84%,显著高于 1:2 时的装载量 ( $P<0.05$ );继续增大芯壁比至 1:6、1:8 时,装载量分别降至 10.71%和 7.40%。柠檬油-环糊精包合体系中芯壁比例影响包合效率和挥发物保留的规律与此类似<sup>[19]</sup>,这可能是因为当芯壁比为 1:2 时, $\gamma$ -CD 用量不足,疏水空腔数量有限,无法完全结合芳樟醇分子,包合不充分;随壁材用量增加至 1:4,空腔数量与芳樟醇分子比例达到最佳匹配,包合位点充足,装载量达到最大值。当芯壁比进一步增大,过量的  $\gamma$ -CD 会稀释包合物中芳樟醇的质量占比;同时,环糊精及其包合物在水溶液中可能发生自缔合或聚集,影响客体分子继续进入疏水空腔<sup>[20]</sup>,从而导致装载量下降。综合比较不同芯壁比下的装载量变化,1:4 时芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物装载量最高,故选择该芯壁比制备包合物并用于后续研究。

### 2.1.2 傅里叶红外光谱分析

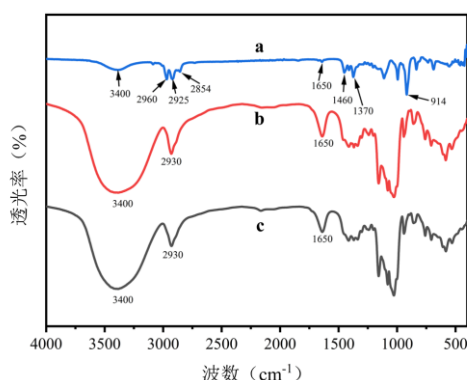


图 3 芳樟醇、 $\gamma$ -CD 和芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的傅里叶红外光谱

Fig.3 Fourier infrared spectra of linalool,  $\gamma$ -cyclodextrin, and linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex

注: a: 芳樟醇; b:  $\gamma$ -CD; c: 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物。

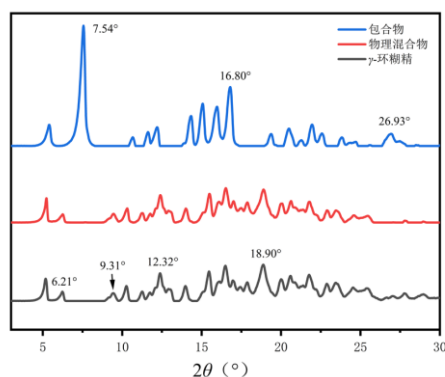
装载量结果初步表明  $\gamma$ -CD 对芳樟醇具有包合作用。为进一步分析芳樟醇与  $\gamma$ -CD 之间的微观结合方式及官能团相互作用,采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)对样品进行结构表征。芳樟醇、 $\gamma$ -CD 及芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的 FTIR 谱图见图 3。 $\gamma$ -CD 在  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  附近出现宽而强的 O-H 伸缩振动峰,  $2\ 930\ \text{cm}^{-1}$  附近为 C-H 伸缩振动峰,  $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$  附近归属于结晶水的弯曲振动,  $1\ 150\sim 1\ 030\ \text{cm}^{-1}$  区域为 C-O-C 与 C-O 的骨架振动,表现出环糊精类物质的典型红外吸收特征<sup>[21]</sup>。芳樟醇在  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  处出现羟基特征峰,  $2\ 960$ 、 $2\ 925$ 、 $2\ 854\ \text{cm}^{-1}$  为甲基和亚甲基的 C-H 伸缩振动,  $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$  为 C=C 伸缩振动,  $914\ \text{cm}^{-1}$  为末端双键面外弯曲振动,为其典型特征峰。

与单一组分相比,包合物的红外光谱呈现明显变化。芳樟醇在  $2\ 960$ 、 $2\ 925$ 、 $2\ 854\ \text{cm}^{-1}$  及  $914\ \text{cm}^{-1}$  处的特征峰显著减弱甚至消失,说明芳樟醇分子进入  $\gamma$ -CD 空腔后,其部分官能团振动受到空间限制或被  $\gamma$ -CD 主体结构屏蔽。纯  $\gamma$ -CD 在  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  处羟基伸缩振动峰峰形更宽,这是由于纯环糊精分子间存在大量缔合氢键,并结合有部分吸附水。形成包合物后,芳樟醇进入  $\gamma$ -CD 疏水空腔,与  $\gamma$ -CD 形成氢键作用,破坏了原有连续的分子间氢键网络,同时体系内自由水分子减少,羟基所处化学环境趋于均一,使得  $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$  羟基吸收峰收窄。已有研究表明,精油类挥发性成分与环糊精形成包合物时,氢键、疏水作用及范德华力等非共价相互作用共同参与主客体复合过程,其中氢键可作为促进客体分子进入环糊精空腔的重要作用力<sup>[22]</sup>。整个谱图中未出现新的特征吸收峰,说明包合过程未产生新的共价键,属于非共价的物理包合。

上述结果表明,芳樟醇分子已进入  $\gamma$ -CD 的疏水空腔内部,官能团振动受到空间限制,二者通过疏水作用、氢键及范德华力形成稳定的包合物,与环糊精包合香精的红外变化规律一致。

### 2.1.3 X-射线衍射分析

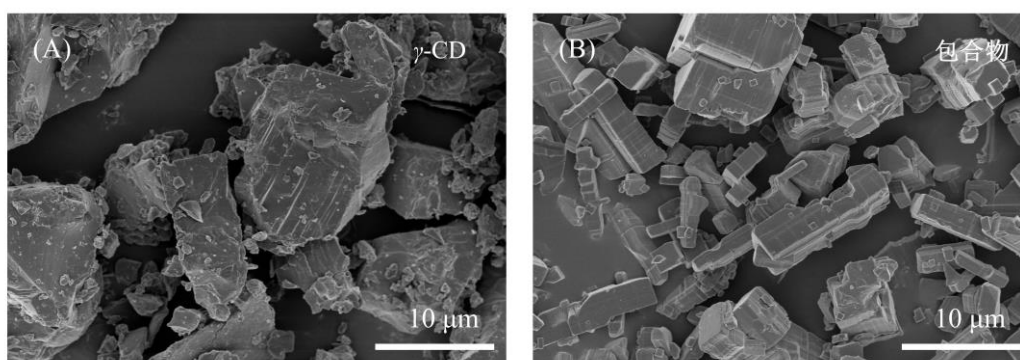


图4  $\gamma$ -CD、芳樟醇/ $\gamma$ -CD 物理混合物及包合物的 XRD 谱图Fig.4 XRD patterns of  $\gamma$ -cyclodextrin, linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin physical mixture and inclusion complex

红外光谱从分子基团层面证实了非共价包合作用的发生,而晶体学结构的重组则是判断真包合物形成的关键依据。因此,进一步通过 X-射线衍射(XRD)对体系的物相组成及晶型转变进行了深度表征。 $\gamma$ -CD、芳樟醇/ $\gamma$ -CD 物理混合物及包合物的 XRD 谱图见图 4。由 XRD 谱图可见,纯  $\gamma$ -CD 在  $2\theta=6.21^\circ$ 、 $9.31^\circ$ 、 $12.32^\circ$ 、 $18.90^\circ$  处呈现一系列尖锐且信号强度较高的特征衍射峰,峰形规整、基线平稳,反映出  $\gamma$ -CD 具有高度有序的晶体堆积结构。芳樟醇与  $\gamma$ -CD 的物理混合物衍射图谱与纯  $\gamma$ -CD 高度吻合,基本保留  $\gamma$ -CD 的主要特征衍射峰,未产生新的特征衍射信号。该结果反映芳樟醇与  $\gamma$ -CD 的物理混合物没有发生包合,因为芳樟醇在常温下为液体,在 XRD 中无尖锐晶态衍射峰,物理混合物与纯  $\gamma$ -CD 谱图一致,芳樟醇与  $\gamma$ -CD 仅简单机械共混,未改变环糊精原有晶体结构,及未发生包合作用。

相较  $\gamma$ -CD 与物理混合物,芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的衍射特征发生明显改变, $\gamma$ -CD 原有特征衍射峰的峰位与强度均出现显著偏移,同时在  $2\theta=7.54^\circ$ 、 $16.80^\circ$ 、 $26.93^\circ$  处出现新的强衍射特征峰,形成与原料及物理混合物完全不同的衍射图谱。已有研究表明<sup>[23]</sup>,环糊精与客体分子形成包合物后,其 XRD 图谱通常会出现原有晶体衍射峰减弱、消失、位移或新衍射峰形成等现象,这可作为判断新晶相或主客体包合结构形成的重要依据。上述结果表明,芳樟醇分子进入  $\gamma$ -CD 疏水空腔后,通过主客体间的弱相互作用破坏了环糊精规整的晶体晶格排列,诱导体系晶体结构发生重构,形成了结构均一的新型主客体包合物,从晶体结构层面证实芳樟醇被有效包合于  $\gamma$ -CD 空腔内。

#### 2.1.4 扫描电镜观察包合物形貌

图5  $\gamma$ -CD 与芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的扫描电镜图Fig.5 SEM images of  $\gamma$ -cyclodextrin and linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex

注:图 A:  $\gamma$ -CD 扫描电镜图;图 B: 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 扫描电镜图。

包合作用引发的晶体内部晶格重组,往往伴随着微观粉体形貌的重塑。在 XRD 揭示晶型改变的基础上,本研究采用扫描电镜(SEM)观察  $\gamma$ -CD 晶体图 5A 和芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物晶体图 5B 在放大 2 400 倍后的形貌图像,直观解析包合前后体系的表面微观形貌特征。由图 5 可见, $\gamma$ -CD 为不规则块状或片状颗粒,大小不均,表面粗糙,带有破碎棱角和碎屑,无固定晶形;包合物则呈现形貌均一的长方体或棒状晶体,颗粒棱角清晰、表面光滑,分散性良好,晶形较原壁材更为规整。



包合前后样品形貌的显著差异表明, 芳樟醇与  $\gamma$ -CD 并非简单物理混合, 包合过程改变了  $\gamma$ -CD 的晶体生长方式, 形成了新的物相, 李世德<sup>[24]</sup>在环氧氯丙烷改性  $\beta$ -环糊精与白藜芦醇包合物的研究中也发现成功制备包合物时, 会有明显区别于其他物质的物相变化。该结果与 XRD、FTIR 分析相互印证, 进一步为芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的成功制备提供了微观形貌学证据。

通过傅里叶红外光谱分析、X 射线衍射分析及扫描电镜形貌观察, 可推断得到芳樟醇已成功被  $\gamma$ -CD 包埋。同时, 通过探究芯壁比对包合物装载率的影响, 得到了制备芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的最佳芯壁比为 1:4, 此时, 装载率为 11.84%。

## 2.2 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物可食性保鲜膜的性质分析

### 2.2.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物可食性保鲜膜外观分析

按照 1.3.2.1 的方法制备成膜液, 烘干后得到不同包合物添加量的膜。由图 6 可知, 各个添加量的膜的形态差异不明显, 都为无色透明薄膜。清晰度较好, 草莓涂膜处理后不会对其外观形态造成太大影响。

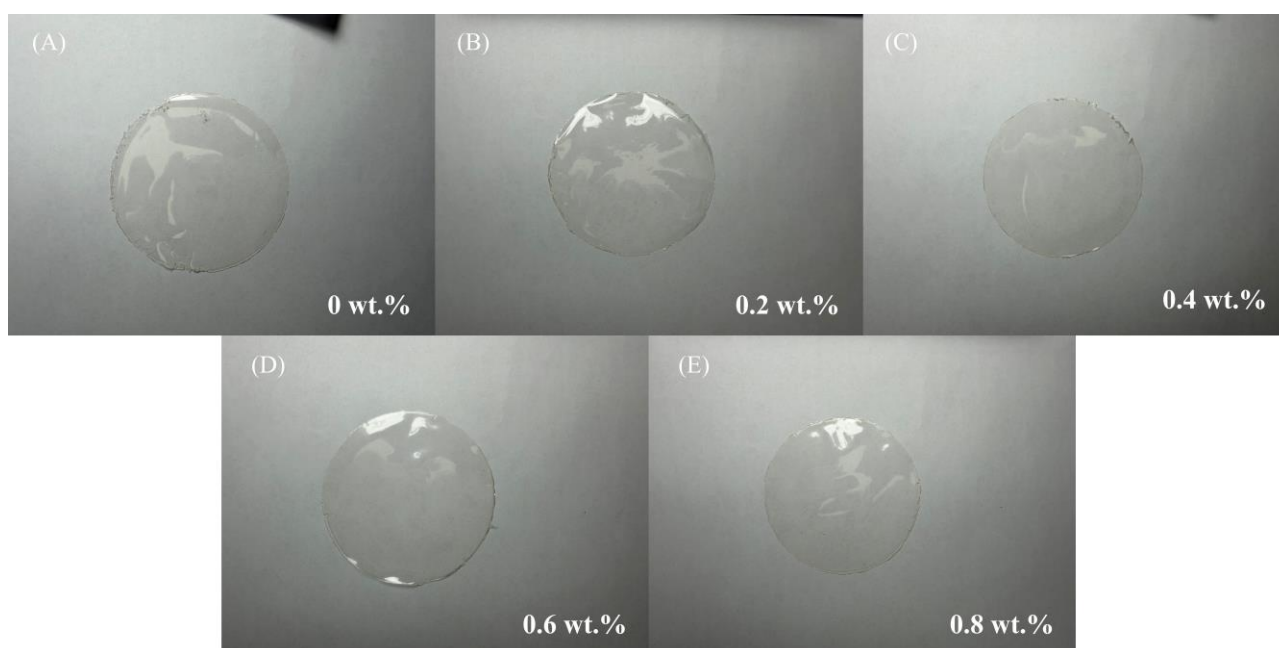


图 6 不同包合物添加量的膜形态图片

Fig.6 Micrographs of film morphology with gradient addition of inclusion complexes

注: 图 A: 包合物添加量为 0 wt.% 的膜图片; 图 B: 包合物添加量为 0.2 wt.% 的膜图片; 图 C: 包合物添加量为 0.4 wt.% 的膜图片; 图 D: 包合物添加量为 0.6 wt.% 的膜图片; 图 E: 包合物添加量为 0.8 wt.% 的膜图片。

### 2.2.2 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物添加量对可食性保鲜膜水蒸气透过系数及溶解率的影响

燕麦  $\beta$ -葡聚糖具有良好的水溶性、成膜性和食用安全性, 可作为可食性保鲜膜的多糖基材。已有研究表明,  $\beta$ -葡聚糖基膜可作为植物精油类活性成分的载体, 适量活性成分的加入有助于改善膜的机械强度、阻隔性能和缓释性能<sup>[12]</sup>。本研究以燕麦  $\beta$ -葡聚糖为成膜基材, 将芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物引入膜体系中。一方面, 燕麦  $\beta$ -葡聚糖可在相对温和、中性条件下形成膜液体系, 有利于维持芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物结构稳定, 减少酸性环境可能导致的芯材提前释放; 另一方面, 包合物与多糖分子链之间可能通过氢键、范德华力等非共价相互作用影响膜网络结构, 进而改变膜的水分迁移特性和水溶性。

不同添加量芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物对可食性保鲜膜水蒸气透过系数的影响见图 7A。由图 7A 可知, 随着包合物添加量的增加, 膜的水蒸气透过系数整体呈先升高后降低的变化趋势。空白膜的水蒸气透过系数为  $1.40 \text{ g mm m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ , 当包合物添加量为 0.2 wt.% 时, 水蒸气透过系数升高至  $1.76 \text{ g mm m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ , 显著高于 0.6 wt.% 和 0.8 wt.% 处理组 ( $P < 0.05$ ); 当添加量增加至 0.4 wt.% 时, 水蒸气透过系数较 0.2 wt.% 处理组有所下降。继续增加包合物添加量至 0.6 wt.% 和 0.8 wt.% 后, 膜的水蒸气透过系数分别降至  $1.26$  和  $1.19 \text{ g mm m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ , 二者之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 说明当包合物添加量达到 0.6 wt.% 后, 继续提高添加量对膜阻湿性能的改善作用

已不明显,水蒸气透过系数下降趋势趋于平缓。

低添加量(0.2 wt.%)包合物的加入可能导致膜基质内部结构疏松,分子间排列不够紧密,从而形成更多水蒸气迁移通道,促进水分扩散,因此水蒸气透过系数升高。随着包合物添加量进一步增加, $\gamma$ -CD与膜基质之间的相互作用增强,包合物能够较均匀地分散于膜网络结构中,提高分子间结合程度,减少自由体积和微孔结构,从而阻碍水蒸气迁移,使膜的阻湿性能增强。此外,芳樟醇本身具有一定疏水性,其包埋后仍可在膜体系中提高疏水区域比例,也有助于降低水分透过率。结果表明,较高浓度的芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物有利于改善可食性保鲜膜的水蒸气阻隔性能。

由图7B可知,随着芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物添加量增加,膜的溶解率整体呈上升趋势。空白组膜溶解率最低,仅为61.95 wt.%,而添加0.6 wt.%和0.8 wt.%包合物后,膜溶解率分别提高至68.00 wt.%和67.90 wt.%,显著高于对照组( $P<0.05$ )。

膜溶解率能够反映膜在水环境中的稳定性及亲水性变化。 $\gamma$ -CD分子中含有大量羟基,具有较强亲水性,其加入后增强了膜与水分子的相互作用,使水分更容易渗透至膜内部,促进膜基质溶胀和溶解,因此膜溶解率升高。虽然芳樟醇具有疏水特性,但其经 $\gamma$ -CD包埋后,体系整体仍表现出较强的亲水性,因此膜溶解率总体增加。

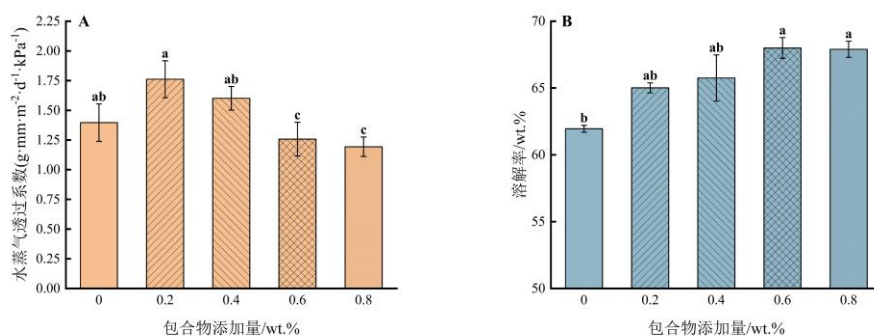


图7 芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物添加量对可食性保鲜膜水蒸气透过系数和溶解率的影响

Fig.7 Effects of the addition amount of linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex on the water vapor transmission coefficient and dissolution rate of edible coating film

注:图A:芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物添加量对可食性保鲜膜水蒸气透过系数的影响;图B:芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物添加量对可食性保鲜膜溶解率的影响。

### 2.2.3 可食性保鲜膜的抗拉强度和延伸率分析

除水环境下的稳定性外,复合涂膜的机械力学性能是决定其能否在果蔬表面形成稳固且具柔韧性保护屏障的核心指标。可食性保鲜膜的机械性能可以通过抗拉伸强度和延伸率进行评价,如图8A,空白组膜的抗拉伸强度最低为15.17 MPa,随着包合物添加量增加,抗拉伸强度先升高,添加量为0.6 wt.%时,达到最高值33.18 MPa,显著高于空白组( $P<0.05$ );继续增大添加量,当添加量为0.8 wt.%时,抗拉伸强度下降至22.60 MPa,该组膜的抗拉伸强度显著低于添加量为0.6 wt.%组膜( $P<0.05$ )。这可能是因为低浓度包合物能够填充膜基质空隙,并通过氢键、范德华力或其他分子间作用与多糖分子链结合,增强膜网络的致密性和应力传递能力,从而提高抗拉强度<sup>[25]</sup>。但当包合物添加量过高时,过量活性组分或包合物在膜基质中易发生聚集或导致相分布不均,形成微孔、缺陷或应力集中点,进而削弱膜的连续结构,使抗拉强度下降<sup>[26,27]</sup>。

延伸率结果表明,包合物添加导致膜柔韧性下降(图8B)。空白组膜延伸率最高为11.04%,各添加组延伸率下降至约5%~7%。这可能是因为, $\gamma$ -CD与膜聚合物链间形成较强的氢键网络,限制链段的运动自由度,使膜在拉伸时更易断裂;同时,芳樟醇包合物的疏水性区域可能局部干扰水合链的滑移能力,降低可食性保鲜膜的延展性。因此,虽然抗拉强度提升,但膜整体韧性下降,表现出更脆的力学特性。

以上研究结果表明,芳樟醇/ $\gamma$ -CD包合物的添加对可食性保鲜膜的阻湿性、水溶性及力学性能均产生一定影响。随着包合物添加量增加,膜的水蒸气透过系数在低添加量时有所升高,而在高添加时明显降低,说明较高添加量有助于提高膜结构致密性并改善阻湿性能;同时,由于 $\gamma$ -CD分子含有较多亲水性羟基,包合物的加入使膜溶解率整体升高。力学性能方面,适量包合物能够增强膜基质分子间相互作用,提高膜的抗拉强度,其中0.6 wt.%

添加量时抗拉强度达到最高;但添加量过高时,包合物可能发生局部聚集,导致膜结构不均一,使抗拉强度下降。延伸率结果表明,包合物加入后膜的柔韧性有所降低,说明其在增强膜强度的同时也限制了聚合物链段运动。综合水蒸气阻隔性能、溶解率和机械性能来看,0.6 wt.%芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物添加量下可食性保鲜膜表现出较好的综合性能,因此选择该添加量用于后续草莓涂膜保鲜实验。

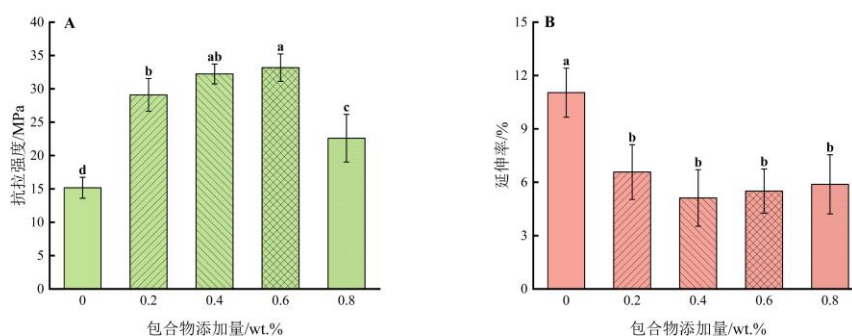


图8 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物添加量对可食性保鲜膜抗拉强度和延伸率的影响

Fig.8 The influence of the addition amount of linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex on the tensile strength and elongation of edible coating film

注: 图 A: 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物添加量对可食性保鲜膜抗拉强度的影响; 图 B: 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物添加量对可食性保鲜膜延伸率的影响。

## 2.3 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物可食性保鲜膜对草莓保鲜能力分析

基于上述膜理化性能的综合评价, 优选 0.6 wt.%包合物添加量作为复合涂膜的最佳配方。草莓属于典型的高代谢易腐浆果, 其组织柔软、含水量高, 采后极易因水分散失、机械损伤及灰霉菌等病原微生物侵袭而迅速软化腐烂<sup>[28]</sup>。鉴于此, 本研究以红颜草莓为实验对象, 评估芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物复合涂膜对其常温贮藏期的保鲜效果。

### 2.3.1 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜处理对草莓腐烂率和腐烂指数的影响

腐烂率和腐烂指数是评价草莓贮藏过程中腐败程度和保鲜效果的重要指标。由表 2 中结果可知, 随着贮藏时间延长, 各处理组草莓的腐烂率和腐烂指数均呈上升趋势, 但不同处理之间上升速率存在明显差异。对照组和包合物添加量为 0 wt.%的涂膜组均在贮藏第 2 d 开始出现腐烂, 而包合物添加量为 0.6 wt.%的处理组在前 2 d 内未出现腐烂, 说明添加芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物的涂膜能够在贮藏初期较好地维持草莓品质。贮藏第 2 d, 清水对照组和 0 wt.%包合物涂膜组的腐烂率分别为 7.47%和 6.57%, 二者差异不显著, 而 0.6 wt.%包合物处理组腐烂率仍为 0, 显著低于其他两组 ( $P<0.05$ )。这表明单纯涂膜处理对草莓早期腐烂的抑制作用有限, 而加入芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物后, 涂膜的保鲜效果明显增强。贮藏第 3 d 后, 各组腐烂程度进一步加重, 其中清水对照组和 0 wt.%包合物涂膜组腐烂率分别升至 24.13%和 24.03%, 而 0.6 wt.%包合物处理组仅为 7.97%, 显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。贮藏末期, 即第 4 d 时, 清水对照组腐烂率达到 49.73%, 0 wt.%包合物涂膜组为 39.87%, 而 0.6 wt.%包合物处理组仅为 16.13%。从腐烂指数来看, 各组变化趋势与腐烂率基本一致。第 4 d 时, 清水对照组腐烂指数为 35.21%, 0 wt.%包合物涂膜组为 29.92%, 而 0.6 wt.%包合物处理组仅为 4.04%, 显著低于其他处理组 ( $P<0.05$ )。这说明 0.6 wt.%芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜不仅能够减少腐烂果实数量, 还能明显降低草莓腐烂程度。

该结果可能与芳樟醇的抑菌活性及  $\gamma$ -CD 包合作用有关。草莓采后腐烂多与灰霉菌等病原微生物侵袭有关。Xu 等<sup>[29]</sup>研究发现, 芳樟醇可有效抑制灰霉菌对草莓果实的侵染, 其作用机制与破坏病原菌细胞膜和线粒体功能有关, 芳樟醇处理可下调麦角固醇生物合成相关酶的表达, 降低真菌细胞膜中麦角固醇含量, 从而削弱细胞膜完整性; 同时还可造成线粒体膜损伤、降低线粒体膜电位和 ATP 含量, 最终影响病原菌正常生长和侵染能力。此外, 芳樟醇本身具有较强挥发性, 直接添加时容易损失, 活性维持时间有限。经  $\gamma$ -CD 包合后, 芳樟醇分子可进入环糊精疏水空腔, 挥发损失得到一定程度控制, 并在贮藏过程中逐步释放, 从而延长其抑菌作用时间<sup>[30]</sup>。可食用涂膜也能够草莓表面形成一定阻隔层, 减少果实与外界环境的直接接触, 降低微生物侵染、水分散失和氧化劣变速率, 延缓草莓的腐烂。



表 2 芳樟醇/  $\gamma$ -CD 涂膜处理对草莓贮藏期间腐烂率及腐烂指数的影响

Table 2 The effect of linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin coating treatment on the decay rate and decay index of strawberries during storage

| 贮藏时间/d | 腐烂率/%                          |                                |                                | 腐烂指数/%                         |                                |                               |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|        | 空白对照组                          | 对照膜组                           | 包合物膜组                          | 空白对照组                          | 对照膜组                           | 包合物膜组                         |
| 0      | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>cA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>cA</sup> |
| 1      | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>cA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>dA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>cA</sup> |
| 2      | 7.47 $\pm$ 0.80 <sup>cA</sup>  | 6.57 $\pm$ 0.57 <sup>cA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>cB</sup>  | 1.87 $\pm$ 0.20 <sup>cA</sup>  | 1.64 $\pm$ 0.14 <sup>cA</sup>  | 0.00 $\pm$ 0.00 <sup>cB</sup> |
| 3      | 24.13 $\pm$ 0.96 <sup>bA</sup> | 24.03 $\pm$ 0.85 <sup>bA</sup> | 7.97 $\pm$ 0.42 <sup>bB</sup>  | 10.10 $\pm$ 0.34 <sup>bA</sup> | 8.02 $\pm$ 0.22 <sup>bB</sup>  | 1.99 $\pm$ 0.10 <sup>bC</sup> |
| 4      | 49.73 $\pm$ 0.65 <sup>aA</sup> | 39.87 $\pm$ 1.55 <sup>aB</sup> | 16.13 $\pm$ 0.67 <sup>aC</sup> | 35.21 $\pm$ 0.43 <sup>aA</sup> | 29.92 $\pm$ 1.18 <sup>aB</sup> | 4.04 $\pm$ 0.16 <sup>aC</sup> |

注：同列小写字母不同表示组内差异显著（ $P<0.05$ ）；同行大写字母不同表示组间差异显著（ $P<0.05$ ）。下表同。

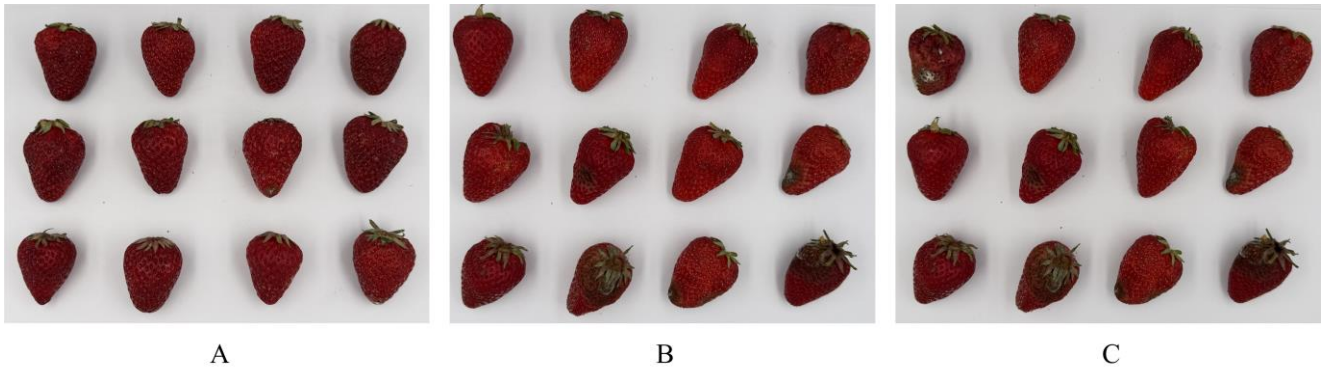


图 9 不同涂膜处理组草莓贮藏 4 d 时实际外观

Fig.9 Photographs of strawberry fruits on the 5th day of storage in different coating treatment groups

注：图 A：包合物膜组；图 B：对照膜组；图 C：空白对照组。

2.3.2 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜处理对草莓贮藏期间硬度、质量损失率和可溶性固形物含量的影响

外观特征与腐烂率直观反映了涂膜的抑菌防腐功效，而果实硬度维持与水分代谢平衡，则是评估保鲜体系物理阻隔效能的重要依据。草莓采后仍保持较强的呼吸代谢和蒸腾作用，贮藏过程中易出现失水、软化及营养物质消耗等现象<sup>[31]</sup>。由表 3 可知，随着贮藏时间延长，各处理组草莓硬度均呈下降趋势，但不同处理组下降幅度存在明显差异。贮藏初期各组草莓硬度均为 1.91 kg cm<sup>-2</sup>，组间无显著差异（ $P>0.05$ ）。贮藏 1 d 后，空白对照组硬度迅速下降至 1.43 kg cm<sup>-2</sup>，而对照膜组和包合物膜组分别为 1.67 kg cm<sup>-2</sup> 和 1.73 kg cm<sup>-2</sup>，显著高于空白对照组（ $P<0.05$ ）。至贮藏第 4 d，空白对照组硬度降至 0.80 kg cm<sup>-2</sup>，对照膜组和包合物膜组分别为 1.09 kg cm<sup>-2</sup> 和 1.23 kg cm<sup>-2</sup>，说明涂膜处理能够在一定程度上延缓草莓软化，其中包合物膜组保持硬度的效果更好。草莓硬度下降主要与果实成熟衰老过程中细胞壁结构破坏有关。贮藏期间，果胶、纤维素等细胞壁组分不断降解，使果肉组织逐渐松散，导致硬度下降<sup>[32]</sup>。涂膜处理后，膜层可覆盖于草莓表面，降低果实与外界环境之间的气体和水分交换速率，从而减缓呼吸代谢和组织软化过程。包合物膜组硬度保持较好，可能与芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物在涂膜中的缓释作用有关。芳樟醇具有一定抑菌活性，能够减少微生物侵染引起的组织破坏；同时  $\gamma$ -CD 对芳樟醇的包合作用有助于降低其挥发损失，使其在贮藏过程中持续发挥作用。因此，包合物膜处理可在维持果实结构完整性方面表现出较好的效果。

质量损失率方面，各处理组均随贮藏时间延长而升高。贮藏第 1 d，空白对照组和对照膜组质量损失率分别为 4.76%和 4.35%，二者差异不显著，而包合物膜组仅为 3.15%，显著低于空白对照组和对照膜组（ $P<0.05$ ）。贮藏至第 4 d 时，空白对照组质量损失率达到 25.41%，对照膜组为 20.90%，包合物膜组为 16.54%，三组之间差异显著（ $P<0.05$ ）。这一结果表明，单纯涂膜可以降低草莓贮藏过程中的水分损失，而添加芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物后，膜的保水效果进一步增强。草莓质量损失主要来源于蒸腾失水和呼吸消耗。空白对照组直接暴露于空气中，果实表面水分散失较快，因此质量损失率升高明显。对照膜组可在果实表面形成一定阻隔层，减少水分向外扩散，从而降低质量损失。包合物膜组质量损失率最低，可能是由于包合物在膜基质中改善了膜层的连续性和致密性，使水分迁移受限；同时芳樟醇的抑菌作用可减缓腐烂造成的组织破损，减少因果皮破坏而引起的水分流失。

可溶性固形物含量是反映草莓糖类等可溶性物质变化的重要指标。由表 3 可知,各处理组草莓可溶性固形物含量在贮藏期间整体呈下降趋势。贮藏初始各组均为 9.83 wt.%,无显著差异 ( $P>0.05$ )。贮藏第 1 d,包合物膜组可溶性固形物含量为 9.60 wt.%,显著高于空白对照组的 9.00 wt.%和对照膜组的 9.10 wt.% ( $P<0.05$ )。贮藏第 4 d,空白对照组、对照膜组和包合物膜组可溶性固形物含量分别下降至 7.40 wt.%、7.70 wt.%和 8.37 wt.%,其中包合物膜组显著高于其他两组 ( $P<0.05$ )。说明芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜能够较好地延缓草莓可溶性固形物的消耗。草莓贮藏过程中,可溶性固形物含量下降主要与呼吸代谢消耗糖类物质有关。虽然果实失水可能在一定程度上造成可溶性物质浓缩,但从本实验结果来看,草莓贮藏期间可溶性固形物整体下降,说明呼吸代谢和衰老过程中糖类消耗占主导作用。包合物膜组可溶性固形物含量保持较高,可能是由于涂膜降低了果实呼吸强度,延缓糖类营养物质的分解;同时芳樟醇缓释所产生的抑菌作用减轻了微生物侵染和腐败过程对果实营养成分的破坏,从而更好地维持草莓贮藏品质。

表 3 芳樟醇/  $\gamma$ -环糊精包合物涂膜处理对草莓贮藏期间硬度、质量损失率及可溶性固性物含量的影响

Table 3 The effects of linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex coating treatment on firmness, mass loss rate and soluble solid content of strawberries during storage

| 贮藏时<br>间/d | 硬度/(kg cm <sup>-2</sup> ) |                         |                         | 质量损失率/%                  |                          |                          | 可溶性固形物含量/wt.%           |                         |                         |
|------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|            | 空白对照组                     | 对照膜组                    | 包合物膜组                   | 空白对照组                    | 对照膜组                     | 包合物膜组                    | 空白对照组                   | 对照膜组                    | 包合物膜组                   |
| 0          | 1.91±0.05 <sup>aA</sup>   | 1.91±0.05 <sup>aA</sup> | 1.91±0.05 <sup>aA</sup> | 0.00±0.00 <sup>eA</sup>  | 0.00±0.00 <sup>eA</sup>  | 0.00±0.00 <sup>eA</sup>  | 9.83±0.06 <sup>aA</sup> | 9.83±0.06 <sup>aA</sup> | 9.83±0.06 <sup>aA</sup> |
| 1          | 1.43±0.10 <sup>bB</sup>   | 1.67±0.05 <sup>bA</sup> | 1.73±0.11 <sup>bA</sup> | 4.76±0.17 <sup>dA</sup>  | 4.35±0.68 <sup>dA</sup>  | 3.15±0.65 <sup>dB</sup>  | 9.00±0.26 <sup>bB</sup> | 9.10±0.10 <sup>bB</sup> | 9.60±0.10 <sup>aA</sup> |
| 2          | 1.30±0.06 <sup>bB</sup>   | 1.56±0.08 <sup>bA</sup> | 1.64±0.09 <sup>cA</sup> | 10.64±0.56 <sup>cA</sup> | 9.81±1.32 <sup>cA</sup>  | 7.34±1.32 <sup>cB</sup>  | 8.43±0.21 <sup>cB</sup> | 8.93±0.21 <sup>bA</sup> | 9.20±0.10 <sup>bA</sup> |
| 3          | 1.12±0.07 <sup>cB</sup>   | 1.32±0.09 <sup>cA</sup> | 1.45±0.07 <sup>dA</sup> | 17.52±1.35 <sup>bA</sup> | 14.45±1.47 <sup>bB</sup> | 10.79±1.58 <sup>bC</sup> | 8.20±0.10 <sup>cC</sup> | 8.67±0.12 <sup>cB</sup> | 9.00±0.26 <sup>bA</sup> |
| 4          | 0.80±0.07 <sup>dB</sup>   | 1.09±0.11 <sup>dA</sup> | 1.23±0.05 <sup>eA</sup> | 25.41±1.30 <sup>aA</sup> | 20.90±1.08 <sup>aB</sup> | 16.54±1.15 <sup>aC</sup> | 7.40±0.10 <sup>dC</sup> | 7.70±0.10 <sup>dB</sup> | 8.37±0.15 <sup>cA</sup> |

2.3.3 芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜处理对草莓贮藏期间 pH 值和可滴定酸含量的影响

除硬度与水分保留这一物理参考外,可通过测量果实内部有机酸的消耗速率,从生化角度反映其采后呼吸代谢强度与腐烂进程。pH 值和可滴定酸含量可反映草莓贮藏过程中酸度变化及有机酸代谢情况。由表 4 可知,贮藏期间各处理组草莓 pH 值总体呈先升高后下降的趋势,可滴定酸含量则表现为先下降后回升。贮藏 1~3 d 内,各处理组 pH 值逐渐升高,可滴定酸含量逐渐降低,表明草莓中的有机酸在贮藏过程中不断被消耗。其中,空白对照组 pH 值上升最快,第 3 d 达到 3.91,可滴定酸含量下降至 0.56 wt.%;对照膜组 pH 值为 3.88,可滴定酸含量为 0.58 wt.%;而包合物膜组 pH 值为 3.84,可滴定酸含量仍保持在 0.65 wt.%,显著高于其他两组 ( $P<0.05$ )。说明芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜能够减缓有机酸消耗,使草莓在贮藏前中期维持较稳定的酸度水平。草莓采后仍进行呼吸代谢,有机酸可作为呼吸底物参与代谢过程,从而导致可滴定酸含量下降、pH 值升高。已有研究表明,草莓贮藏过程中 pH 值升高与主要有机酸含量下降密切相关<sup>[33]</sup>。包合物膜组有机酸下降较慢,可能是由于涂膜在果实表面形成一定阻隔层,降低了气体交换和呼吸代谢速率;同时,芳樟醇经  $\gamma$ -CD 包合后能够较稳定地释放,在一定程度上抑制腐败微生物生长,减轻组织劣变对酸代谢的影响。因此,与空白对照组相比,包合物膜处理更有利于延缓草莓酸度下降。

贮藏第 4 d 时,各组 pH 值较第 3 天有所下降,可滴定酸含量则出现回升。空白对照组和对照膜组可滴定酸含量分别回升至 0.73 wt.%和 0.72 wt.%,而包合物膜组为 0.68 wt.%。这一现象可能与果实组织劣变和腐败微生物代谢产酸有关。乙酸菌、乳酸菌及部分采后病原真菌可通过代谢碳水化合物或分泌有机酸改变果实组织酸度,使酸度回升并导致 pH 值降低<sup>[34,35]</sup>。包合物膜组可滴定酸含量回升幅度较小,说明其能够延缓草莓中有机酸的消耗和腐败过程,可有效延长草莓保鲜期。

表 4 芳樟醇/  $\gamma$ -CD 包合物涂膜处理对草莓贮藏期间 pH 值及可滴定酸含量的影响

Table 4 The effect of linalool/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complex coating treatment on pH value and titratable acid content of strawberries during storage

| 贮藏时间/d | pH 值                    |                         |                         | 可滴定酸含量/wt.%             |                         |                         |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|        | 空白对照组                   | 对照膜组                    | 包合物膜组                   | 空白对照组                   | 对照膜组                    | 包合物膜组                   |
| 0      | 3.67±0.01 <sup>eA</sup> | 3.67±0.01 <sup>dA</sup> | 3.67±0.01 <sup>dA</sup> | 0.76±0.03 <sup>aA</sup> | 0.76±0.03 <sup>aA</sup> | 0.76±0.03 <sup>aA</sup> |
| 1      | 3.76±0.01 <sup>cA</sup> | 3.72±0.02 <sup>cB</sup> | 3.73±0.02 <sup>cB</sup> | 0.74±0.01 <sup>aB</sup> | 0.73±0.00 <sup>aB</sup> | 0.75±0.01 <sup>aA</sup> |

| 现代食品科技 | Modern Food Science and Technology |                         |                         |                         |                         | 2026, Vol.42, No.12     |
|--------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 2      | 3.83±0.02 <sup>bA</sup>            | 3.82±0.01 <sup>bA</sup> | 3.76±0.03 <sup>bB</sup> | 0.67±0.02 <sup>cB</sup> | 0.67±0.03 <sup>cB</sup> | 0.73±0.01 <sup>bA</sup> |
| 3      | 3.91±0.03 <sup>aA</sup>            | 3.88±0.01 <sup>aA</sup> | 3.84±0.01 <sup>aB</sup> | 0.56±0.01 <sup>dB</sup> | 0.58±0.01 <sup>dB</sup> | 0.65±0.04 <sup>bA</sup> |
| 4      | 3.73±0.02 <sup>dB</sup>            | 3.74±0.03 <sup>bB</sup> | 3.79±0.03 <sup>cA</sup> | 0.73±0.01 <sup>bA</sup> | 0.72±0.02 <sup>bA</sup> | 0.68±0.01 <sup>aB</sup> |

以上研究表明,在常温贮藏环境下,芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物涂膜处理能够有效延缓草莓外观的品质劣变,抑制草莓腐烂变质,草莓的货架期至少延长 1 d,在 4 d 货架期内可有效减少贮藏期间水分、可溶性固形物、可滴定酸损耗,延缓草莓腐败变质,有利于草莓保鲜贮藏。

### 3 结论

本研究采用水溶液搅拌法制备芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物,并将其引入燕麦  $\beta$ -葡聚糖可食用膜中。结构表征结果证实芳樟醇成功包埋于  $\gamma$ -CD 空腔内,形成稳定包合物。包合物的添加改善了膜的综合性能,其中 0.6 wt.%添加量时膜表现出较优的阻隔性能和力学性能。草莓保鲜试验表明,该活性膜能够有效抑制果实腐烂,减缓品质劣变,延长货架期。研究表明,芳樟醇/ $\gamma$ -CD 包合物在可食用活性包装领域具有良好的应用潜力,可为天然活性物质的稳定化利用及果蔬保鲜材料开发提供参考。在此基础上,该包合方法也可作为芳樟醇在其他食品体系中的稳定负载和香气强化提供思路,通过调控其释放行为改善食品香气持久性,并为开发具有舒缓香气特征和潜在情绪调节辅助功能的食品提供参考。

### 参考文献

- [1] 邢宏杰.草莓果实采后腐烂及货架期预测模型研究[D].南京:南京农业大学,2010.
- [2] JESÚS R T G, ARNULFO L E, MARÍA V A P, et al. Bacillus subtilis Edible Films for Strawberry Preservation: Antifungal Efficacy and Quality at Varied Temperatures [J]. Foods, 2024, 13(7): 980.
- [3] 曹佳媛,胡玮楠,程金菊.草莓防腐保鲜可食用膜的制备与研究[J].现代农业科技,2019,12:223-226.
- [4] AN Q, REN J N, LI X, et al. Recent updates on bioactive properties of linalool [J]. Food & function, 2021, 12(21): 10370-10389.
- [5] YOSHIKI S, CHIHIO H, KEIKO T, et al. Sedative effect on humans of inhalation of essential oil of linalool: [J]. Analytica Chimica Acta, 1998, 365(1-3): 293-299.
- [6] XU R R, HU W L, ZHOU J H, et al. Preparation of linalool microcapsules and its application on preservation and antifungal protection in postharvest sweet cherry. [J]. Food Chemistry, 2026, 503: 147821.
- [7] CIOBANU A, MALLARD I, LANDY D, et al. Inclusion interactions of cyclodextrins and crosslinked cyclodextrin polymers with linalool and camphor in Lavandula angustifolia essential oil [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(3): 1963-1970.
- [8] 侯文菁.环糊精缓释香精的制备及缓控释机制研究[D].上海:上海应用技术大学,2020.
- [9] KOU X R, ZHANG Y Q, SUN D D, et al. Study on host-guest interaction of aroma compounds/ $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complexes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 178: 114589.
- [10] ZHANG J, ZHANG M, WANG Y, et al. Oral soluble shell prepared from OSA starch incorporated with tea polyphenols for the microencapsulation of Sichuan pepper oleoresin: Characterization, flavor stability, release mechanisms and its application in mooncake [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139478.
- [11] 吴传超,任文雅,朱昌玲,等.山奈酚/ $\beta$ -环糊精包合物的制备及其体外益生活性[J].食品工业科技,2026,47(14):72-82.
- [12] LIN J, DAI J, YANG Q, et al. Preparation and characterization of Salecan  $\beta$ -glucan-based edible film loaded with lemon essential oil nanoemulsion: Effects on the preservation of chilled pork [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143598.
- [13] 邹颖,寸金玉,彭芍丹,等.高良姜精油可食膜的制备及其在鲜切菠萝保鲜中的应用[J].热带作物学报,2025,46(5):1249-1258.
- [14] 秦琛强,李方东,傅晓,等.芝麻油脂体可食用膜的制备及其在草莓保鲜中的应用[J].食品科学,2024,45(7):243-251.
- [15] 张伟,李欣,金桂萍,等.南瓜皮粗多糖/壳聚糖复合膜的构筑及性能表征[J/OL].现代食品科技,1-9[2026-06-03].
- [16] 尹国友,杨卓凡,孙婕,等.酶交联法制备肉桂精油-明胶-壳聚糖可食用膜及其保鲜效果研究[J].食品与发酵工业,2025,51(23):194-201.
- [17] 宋淑红,王子钰,邵丽竹,等.艾叶多糖对草莓腐败菌的抑制及保鲜应用[J].河南农业科学,2025,54(11):172-180.
- [18] 项丹丹,项梦丹,孙龙.银负栽卟啉-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+88.
- [19] BHESH R B, BRUCE R D A, LIEN L T B. Lemon oil to  $\beta$ -cyclodextrin ratio effect on the inclusion efficiency of  $\beta$ -cyclodextrin and the retention of oil volatiles in the complex [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(4): 1494-1499.

- [20] THORSTEINN L, MÁR M. Self-Association of Cyclodextrins and Cyclodextrin Complexes [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2004, 93(5): 1091-1099.
- [21] HOGENBOM J, JONES A, WANG H V, et al. Synthesis and Characterization of  $\beta$ -Cyclodextrin-Essential Oil Inclusion Complexes for Tick Repellent Development [J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1892.
- [22] MING L S, XIAO Z J, NIE Z Y, et al. Encapsulation of essential oil in cyclodextrin: An exploration of rational design, molecular interactions, and activity assessment [J]. *Industrial Crops & Products*, 2025, 226:120611.
- [23] BASHAR A, KHALED S, HEBA H, et al. Cyclodextrins-digitonin inclusion complexes: Synthesis, characterization, and thermal stability for enhanced encapsulation performance [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2026, 1360: 145624.
- [24] 李世德.白藜芦醇/环糊精包合物的制备及其应用研究[D].广州:广东工业大学,2025.
- [25] LI M Y, LUO X Q, ZHU R X, et al. Development and characterization of active bilayer film incorporated with dihydromyricetin encapsulated in hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin for food packaging application [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107834.
- [26] ADJALI A, PONTILLO A R N, KAVETSOU E, et al. Clove Essential Oil-Hydroxypropyl- $\beta$ -Cyclodextrin Inclusion Complexes: Preparation, Characterization and Incorporation in Biodegradable Chitosan Films [J]. *Micro*, 2022, 2(1): 212-224.
- [27] KARTHIKEYAN V, NARIN C, PARAMEE N, et al. Influence of pomelo pericarp essential oil on the structural characteristics of gelatin-arrowroot tuber flour-based edible films [J]. *RSC Advances*, 2024, 14(37): 27274-27287.
- [28] 刘艺伟.长白山区红酸浆活性成分提取及应用于草莓保鲜研究[D].长春:吉林农业大学,2025.
- [29] XU Y Q, TONG Z C, ZHANG X, et al. Unveiling the Mechanisms for the Plant Volatile Organic Compound Linalool To Control Gray Mold on Strawberry Fruits [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(33): 9265-9276.
- [30] NIU Y W, DENG J, XIAO Z B, et al. Preparation and slow release kinetics of apple fragrance/ $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 143(5): 1-7.
- [31] TARANGINI K, KAVI P, JAGAJJANANI R K. Application of sericin-based edible coating material for postharvest shelf-life extension and preservation of tomatoes [J]. *EFood*, 2022, 3(5): e36.
- [32] GUO B Y, LIU G, YE W H, et al. Multifunctional carbon dots reinforced gelatin-based coating film for strawberry preservation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109327.
- [33] LI H, YIN Y, AFFANDI F Y, et al. High CO<sub>2</sub> reduces spoilage caused by *Botrytis cinerea* in strawberry without impairing fruit quality [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 842317.
- [34] NESRIN Y A, CENGIZ C, MUHAMMED Y. The Individual and Combined Effects of Electrolyzed Water and Chitosan Coating Applications on the Storage Stability of Fresh Strawberries [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2025, 18(6): 1-17.
- [35] GAO Q, ZHANG Y, GAO C C, et al. The Microbial Diversity in Relation to Postharvest Quality and Decay: Organic vs. Conventional Pear Fruit. [J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2023, 12(10): 1980.