

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.011

曹川, 解鹏. β -环糊精与柠檬精油、月桂精油包合物的表征、热稳定性和抑菌性能评价[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 75-82.CAO C, JIE P. Characterization, thermal stability and antibacterial performance evaluation of β -cyclodextrin inclusion complexes with lemon essential oil and laurel essential oils[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 75-82.

β -环糊精与柠檬精油、月桂精油包合物的表征、热稳定性和抑菌性能评价

曹川¹, 解鹏^{1,2}

(1. 安徽职业技术学院 环境与生命健康学院, 安徽合肥 2300111;

2. 南京财经大学 粮食经济研究院, 江苏南京 210023)

摘要: 用共沉淀法制备了柠檬精油 (LEEO) 和月桂精油 (LAEO) 与 β -环糊精 (β -CD) 的包合物, 旨在提高植物精油的稳定性并实现其控制释放。通过扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、X 射线衍射 (XRD) 以及热重-差示热量扫描联用仪 (TGA-DSC) 对所制备的包合物进行了全面表征。SEM 图像显示精油分子被有效地嵌入 β -CD 分子的内腔中, 这一结构有助于精油分子抵御外界环境的影响, 从而增强其稳定性。FTIR 和 XRD 的结果进一步证实了包合物的形成, TGA-DSC 分析表明, 与未包合的精油相比, 包合物展现出了更佳的热稳定性, 这对于需要热处理的应用场景, 如食品加工或制药行业, 具有重要意义。抗菌性能测试显示, LEEO 和 LAEO 对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均具有显著的抗菌效果。 β -CD 的包合作用不仅提高了精油的稳定性, 还显著延长了其抗菌活性, 它作为一种高效的壁材, 其微胶囊化技术在食品包装行业的应用前景广阔。

关键词: β -环糊精; 精油; 包埋; 微胶囊

中图分类号: TS20 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)02-0075-08

网络首发时间: 2025-02-12 10:43:43

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250212.1011.004>

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2024-10-20; 录用日期: 2024-10-21

基金项目: 安徽省 2023 年省级质量工程项目“食品检验检测技术专业教师教学创新团队”(2022cxtd076); 安徽省高等学校自然科学研究项目重大项目“山苍子精油-大环糊精微胶囊制备、性质表征及缓释性能研究”(2022AH040276); 2023 年安徽省职业与成人教育学会教育科研规划课题“食品检验检测技术一流专业群建设路径的探索与实践”(AZCJ2023049)

Supported by: Anhui Province 2023 Provincial Quality Engineering Project “Teaching Innovation Team of Teachers of Food Inspection and Testing Technology” (No. 2022CXTD076); Anhui Provincial Higher Education Natural Science Research Project “Preparation and Characterization of Microcapsules of Litsea Cubeba Essential Oil-macroclidoxtrin Microcapsules” (No. 2022AH040276); 2023 Anhui Vocational and Adult Education Society Education and Scientific Research Planning Project “Exploration and Practice of the Construction Path of First-class Professional Group in Food Inspection and Testing Technology” (No. AZCJ2023049)

第一作者: 曹川, 女, 1988 年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮油储藏与检测, E-mail: 877542357@qq.com

Characterization, Thermal Stability and Antibacterial Performance Evaluation of β -Cyclodextrin Inclusion Complexes with Lemon Essential Oil and Laurel Essential Oils

CAO Chuan¹, JIE Peng^{1,2}

(1. Anhui Vocational and Technical College Faculty of Environment and Life Health, Hefei, Anhui 2300111, China; 2. Nanjing University of Finance and Economics Institute of Food Economics, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: This study successfully prepared inclusion complexes of lemon essential oil (LEEO) and Laurel essential oil (LAEO) with β -cyclodextrin (β -CD) using the co precipitation method, with the aim of enhancing the stability of plant essential oils and achieving their controlled release. The prepared inclusion complexes were comprehensively characterized using scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and thermogravimetric analysis-differential scanning calorimetry (TGA-DSC). SEM images reveal that essential oil molecules are effectively encapsulated within the inner cavities of β -CD molecules, which enables the essential oil molecules resist external environmental influences and enhance their stability. The results of FTIR and XRD further confirmed the formation of the inclusion complex, laying the foundation for studying their physicochemical and chemical properties. In addition, TGA-DSC analysis showed that the inclusion complex exhibited better thermal stability compared to unencapsulated essential oils, which holds great significance for applications that require heat treatment, such as food processing or pharmaceutical manufacturing. Antibacterial performance tests demonstrate that LEEO and LAEO exist significant antibacterial effects against both *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. The encapsulation effect of β -CD not only enhances the stability of essential oils, but also significantly extends their antibacterial activity. As an efficient wall material, β -CD can significantly enhance the stability and antibacterial performance of essential oils, and its microencapsulation technology has broad application prospects in the food packaging industry.

Key words: β -cyclodextrin; essential oils; encapsulation; microcapsules

由微生物污染引起的食源性疾病和食品中毒对环境健康和公共卫生构成了严重威胁。化学合成抗菌剂可能带来的健康风险，如致癌性和致畸性，因此开发和应用天然且安全的抗菌剂显得尤为关键。植物通过合成萜类、酚类和含氮有机分子等次级代谢产物来抵御环境压力，其中萜类化合物丰富的植物精油在防护病原微生物和害虫方面显示出巨大潜力。植物精油以其天然、无害的特性，具备广泛的生物活性，包括抗菌、抗肿瘤、抗炎、抗氧化和驱虫等，使其在食品保鲜领域展现出巨大的应用潜力^[1]。然而，由于其易挥发、水溶性差和具有刺激性气味，这些特性限制了植物精油的广泛应用^[2]。微胶囊技术通过使用天然或合成的高分子材料作为外壳，将精油等活性成

分封装，从而提高其稳定性并实现缓释效果，减少环境因素对其活性成分的影响^[3]， β -环糊精利用其独特的化学结构，即亲水性外层和疏水性内层，与精油分子形成复合物，增强了精油的水溶性，并提供了保护和缓释功能^[4]。微胶囊化的精油易于运输，并且由于其良好的分散性，可以方便地与其他材料混合使用，提高使用效率，从而显著提升其商业价值^[5-6]。

在 β -环糊精微胶囊的制备方法中，包括超声波法、研磨法、喷雾干燥法和共沉淀法等^[7-8]。其中共沉淀法操作简单，能够保持较高的精油保留率，适合制备精油微胶囊^[9-10]。因此本研究采用共沉淀法，以 β -环糊精为壁材，柠檬和月桂精油为芯材，制备了精油/ β -CD 微胶囊，并通过 X 射

线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 和傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 等技术对微胶囊进行了表征。这些微胶囊有望作为果蔬保鲜剂和饲料添加剂, 为精油在食品和饲料行业的应用提供了参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

月桂精油 (Lavender essential oil, LAEO): 上海源叶生物科技有限公司; 柠檬精油 (Lemon essential oil, LEO): 麦克林试剂有限公司; 大肠杆菌 (ATCC 8739)、金黄色葡萄球菌 (ATCC 43300): 上海菌种保藏中心。其余所有化学药品和试剂均由国药集团化学试剂有限公司提供。

Scientz-10N/C 台式冷冻干燥机: 宁波新芝生物科技有限公司; 紫外可见分光光度计: 北京普析通用仪器有限公司; HC-3018 离心机: 安徽中科中佳科学仪器有限公司; Nicolet iS10 傅里叶变换红外光谱仪: 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; X 射线衍射仪 TD-3500: 丹东通达科技有限公司; 扫描电子显微镜 SEM SU8010: 日本日立仪器公司; TA-STD650 同步热分析仪: 美国 TA 仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 封装效率测定

封装效率 (Embedding efficiency, EE) 测定用紫外分光光度计在不同波长处对芳香化合物进行定量分析^[11], 根据文献[12]报道的方法计算包合物中精油的含量。将精油与 β -CD 包合物溶解在 95%乙醇中 24 h, 然后以 5 000 r/min 离心 15 min 保留上清液, 绘制柠檬精油和月桂精油的乙醇溶液的标准曲线回归方程。

EE 根据以下公式计算^[13]。

$$EE = \frac{\text{截留活性物质含量}}{\text{初始活性物质含量}} \times 100\% \quad \text{式 (1)}$$

1.2.2 微观结构观察

按照文献[12]的方法, 进行样品喷涂处理, 通过 Hitachi 场发射扫描电子显微镜观察样品颗粒的微观形态和结构。加速电压为 1.0 kV, 放大倍数为 1 000 倍。

1.2.3 晶体结构测定

根据文献[14]报道使用 X 射线衍射仪测定 β -CD 以及包合物的 XRD 图谱。仪器参数设置如下: 室温 Cu 靶, $K\alpha$ 射线, 电压 35 kV, 电流 25 mA, 扫描角度 (2θ) 范围 $2\sim 50^\circ$, 角度增量 0.05。

1.2.4 傅里叶变换红外光谱测定

使用傅里叶变换光谱仪测定了精油、 β -CD 以及包合物的红外光谱, 将精油滴在溴化钾晶片中间, β -CD 和包合物粉末与干燥的溴化钾晶体 (1 : 100, v/v) 混合后在玛瑙研钵中充分研磨, 然后压成薄片。在 $4\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$ 波长范围下进行光谱扫描。

1.2.5 热力学特性测定

使用 TG-DSC 联用仪对精油和包合物进行热重分析, 在 50 mL/min 的氮气流下, 温度以 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 从 $30\ ^\circ\text{C}$ 升到 $800\ ^\circ\text{C}$ 。

1.2.6 抑菌活性测定

柠檬精油、月桂精油及其微胶囊的抗菌活性测定根据文献描述做了相应改动^[15], 以大肠杆菌和金黄色葡萄球菌为试验菌株, 将含有精油或微胶囊样品滴加到滤纸上 (6 mm) 扩散培养板 (直径 90 mm) 上, 以滴加蒸馏水的滤纸片作为对照, 使用密封膜覆盖培养皿, 抑菌时间选择 1、3、5 和 7 d。

1.3 数据处理

利用 Origin8.0 软件对分析测得的数据进行处理, 数据的显著性用 SPSS 21.0 软件分析, 以平均值 \pm 标准差的形式表示结果。

2 结果与分析

2.1 包埋率

两种精油复合物的不同摩尔比的包埋率如图 1 所示。 β -环糊精包封客体分子需要特定的条件过程, 通过利用水溶液共沉淀技术对精油和 β -环糊精的络合过程进行优化, 得到两种精油包合物的包埋率在 45.4%~78.8%。通过改变 β -CD 与精油的摩尔比, 发现精油被包裹在 β -环糊精的空腔中, 当比值从 1 : 3 增加到 1 : 5 时包埋率呈现递增, 当 LAEO/ β -CD 和 LEO/ β -CD 的比值为 1 : 5, 包埋率达到最大值, 复合物中的精油含量分别约

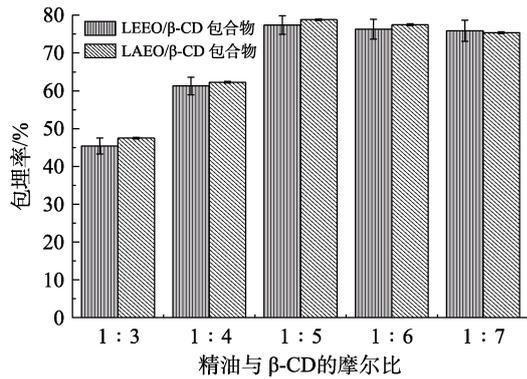


图 1 不同摩尔比柠檬精油和月桂精油与 β-CD 的包封效率
Fig.1 Encapsulation efficiency of different molar ratios of lemon essential oil and Laurel essential oil with β-CD

为 78.8%和 77.4%。然而，当比例从 1:5 到 1:7 时，观察到包埋率缓慢下降。这可能是由于精油和 β-CD 之间的相互作用、客体分子的化学结构

和物理化学性质所决定的。

2.2 扫描电子显微镜分析

在图 2 中，我们可以看到包合物和 β-环糊精 (β-CD) 的表面形态。包合物的粉末形态呈现为不均匀的多面立方体，而 β-CD 则表现为不规则的块状结构。以往的研究，包括使用桉树或橙子精油的实验，已经探讨了 β-CD 的形态变化。这些研究发现，包合物的颗粒大小和形状与 β-CD 存在差异，这表明了复合物的形成^[16]。虽然包合物复合体的形状是不均匀的但其表面并没有出现断裂的聚集体结构。这可能是由于 β-CD 的亲水性性质以及其空腔结构，这些特性使得 β-CD 能够有效地包裹精油分子，并为精油分子提供了一个保护性的屏障。

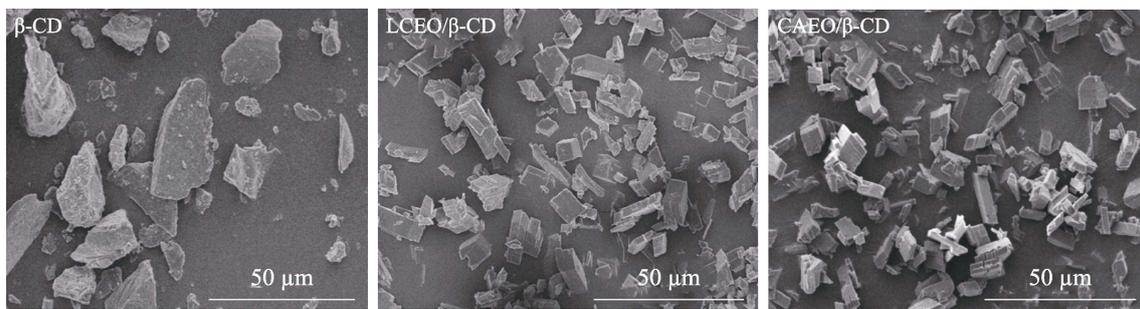


图 2 β-CD 和包合物的颗粒形态图 (放大倍数 1 000)
Fig.2 Particle morphology of β-CD and inclusion complexes (magnification 1 000)

2.3 FTIR 分析

精油、β-CD 以及它们形成的包合物的 FTIR 分析结果如图 3 所示。在 β-CD 的红外光谱中，可以观察到几个特征吸收峰：3 383 cm⁻¹ 处的吸收峰对应于羟基 (O—H) 的对称伸缩振动；2 924 cm⁻¹ 处的吸收峰与碳氢键 (C—H) 的伸缩

振动相关；1 157 cm⁻¹ 和 1 029 cm⁻¹ 处的吸收峰分别对应于醚键 (C—O—C) 的对称和不对称伸缩振动。这些特征吸收峰与文献中先前研究的 β-CD 红外光谱特征一致，且在形成包合物后，这些特征吸收峰的谱带变化不大。对于精油的红外光谱分析，以 LEEO 为例，其 3 072 cm⁻¹ 处的吸收峰

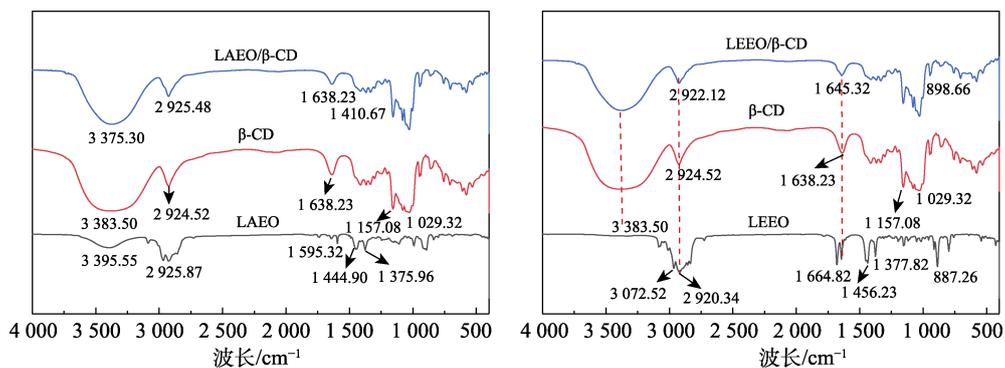


图 3 β-CD、精油以及包合物的 FTIR
Fig.3 FTIR spectra of β-CD, essential oils and inclusion complexes

归因于烯烃双键上的 C—H 伸缩振动；2 920 cm^{-1} 处的吸收峰则由饱和 C—H 键的伸缩振动引起；1 664 cm^{-1} 处的吸收峰则与 C=C 双键的伸缩振动有关。1 456 cm^{-1} 和 1 377 cm^{-1} 处的吸收峰分别与甲基和亚甲基的 C—H 面内不对称和对称变形振动有关；887 cm^{-1} 处的吸收峰则是由于取代端烯上的 C—H 弯曲振动引起。在 LAEO 的红外光谱中， CH_2 基团的振动在 2 925 cm^{-1} 处显示出特征吸收峰^[3]。而在包合物中特征吸收峰也被相应的检测出来，但是信号强度有所变化，结果表明精油分子被成功地包埋在 β -CD 的空腔中，形成了稳定的包合物。根据文献报道，客体分子的嵌入会减少其运动自由度，从而降低其红外光谱中的信号强度^[17-18]。客体分子特征吸收峰的变化，如峰强度的降低、消失或加宽，与 β -CD 空腔中客

体分子的振动受限有关，这进一步证实了包合物的形成^[12]。

2.4 XRD 分析

精油与 CD 形成复合物有不同结晶结构，每个结构都具有特征性的 X 射线衍射图（图 4）。 β -CD 和包合物都显示出强烈且尖锐的衍射峰，这表现出典型的晶体特性。 β -CD 在 $2\theta=12.85^\circ$ 和 22.85° 处的衍射峰被认为是具有与笼型晶体结构相关的显著特征峰，在笼型晶体结构中包合作用通常是通过 CD 分子的通道式排列来确定的，在这种排列中客体分子进入柱状通道并相互排列和堆叠，可以看到 β -CD 在 $2\theta=15\sim 25^\circ$ 处有多个连续的衍射峰，形成包合物后衍射峰减少，这些晶体结构的特征衍射峰合并，并形成一个新的较宽的衍射峰。

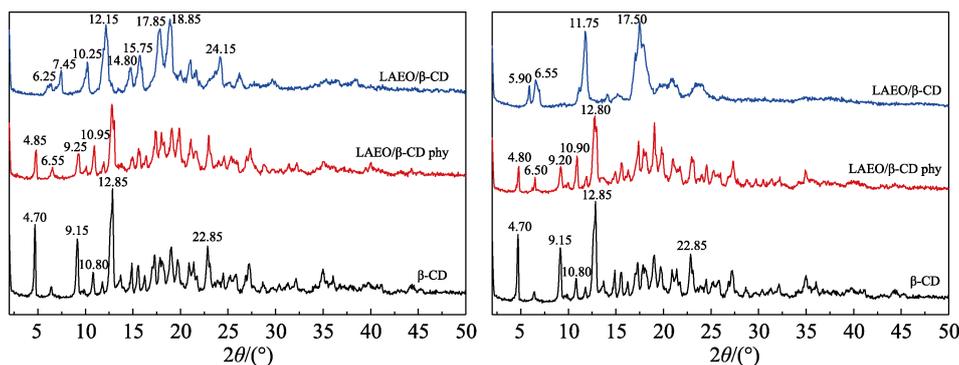


图 4 β -CD、物理混合物和包合物的 XRD 图

Fig.4 XRD patterns of β -CD, physical mixtures, and inclusion complexes

如图所示 β -CD 在 $2\theta=9.15^\circ$ 、 10.80° 、 12.85° 处有明显的衍射峰，但在包合物中这些关于 β -CD 的特征衍射峰消失，包合物分别在 2θ 为 18.85° 和 17.5° 处出现了新的衍射峰，通过测定特征衍射峰消失或移动，新衍射峰的出现以及结晶或非晶化程度的变化来表征因组分之间的相互作用而引起的晶体性质的变化，可以表明反应形成了一个新的固相，从而支持了包合物的形成^[19]。

2.5 热力学性质分析

2.5.1 热重分析

热重分析 (Thermal gravimetric analysis, TGA) 是一种常用的热分析方法。各物质的 TGA 如图 5 所示，游离的精油分子在 $50\sim 260^\circ\text{C}$ 重量损失达 95% 以上，失重温度 $\text{LAEO} < \text{LEEO}$ ，表明

LEEO 的热稳定好于 LAEO，但两者的质量损失发生在较低的温度 (250°C)，精油的热稳定性都较差。从图中可以看出包合物主要有两个失重阶段，第一个阶段发生在较低的温度下，失重 12.3%~17.6%，主要是与水分损失有关；第二个阶段发生在 $305\sim 345^\circ\text{C}$ ，失重 74.6%~82.8%，对应主要的减重阶段，这与该阶段中复合物的热分解有关。在络合的情况下，由于主-客体的相互作用，通常易挥发的客体分子在包合物中的稳定性会增加。与 LAEO 相比，LAEO/ β -CD 的失重温度最高，表明其热稳定最好，显示出较慢的重量损失率和较小的总重量损失，这表明分子在更高的温度下有更大的纠缠和聚集机会^[20]。精油分子在高温下存在和热稳定性增强是证实它与 β -CD 络合的有力证据。

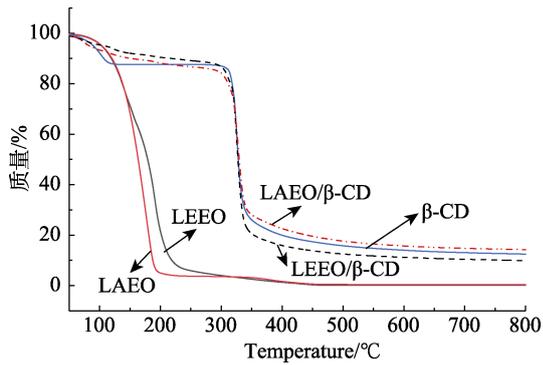


图 5 β -CD、精油和包合物的 TGA 图
 Fig.5 TGA spectra of β -CD, essential oils, and inclusion complexes

2.5.2 差示扫描热量分析

从图 6 中可以观察精油和包合物的热性质，在本研究中，由于客体分子的结构不同，LAEO 在 178.4 °C 处有吸热峰，对应于该物质的热分解温度，而 LEEO 在 142.8 °C 和 193.3 °C 处有两个吸热峰，这可能是与物质在升温过程中的分步降解有关^[2]。结合热重曲线精油的主要热降解失重

阶段发生在 200 °C 左右，从开始升温就陆续发生降解；当精油与 β -CD 形成包合物后，主要的质量损失发生在 304~345 °C，能在较高的温度下存在，我们观察到包合物差示热量扫描法 (Differential scanning calorimetry, DSC) 分析的整个加热过程被分为两个阶段 (吸热阶段和分解阶段)。包合物在较低温度处的吸热峰 LAEO/ β -CD (77.7 °C, 115.7 °C)、LEEEO/ β -CD (68.5 °C, 122.6 °C)，这对应于复合物中水分损失的吸热峰。通过比较客体分子和包合物的 DSC 曲线，随着包合物的形成，精油分子不断进入腔体，客体分子断开共价键，而通过氢键、范德华力和疏水相互作用与壁材作用稳定地存在于 CD 腔中。客体分子插入 β -CD 空腔后，精油分子的热分解吸热峰消失。表明精油与 β -CD 之间存在较强的相互作用。这可以说明，精油分子经 β -CD 包封后其热稳定性增强。

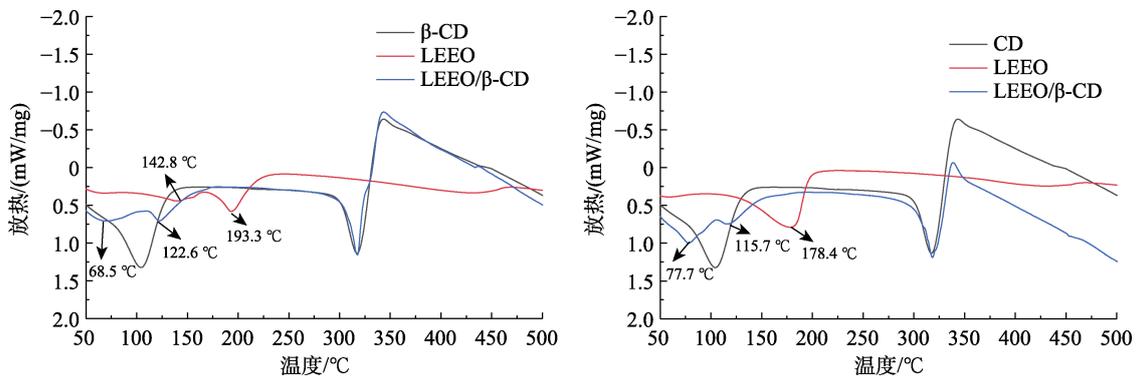
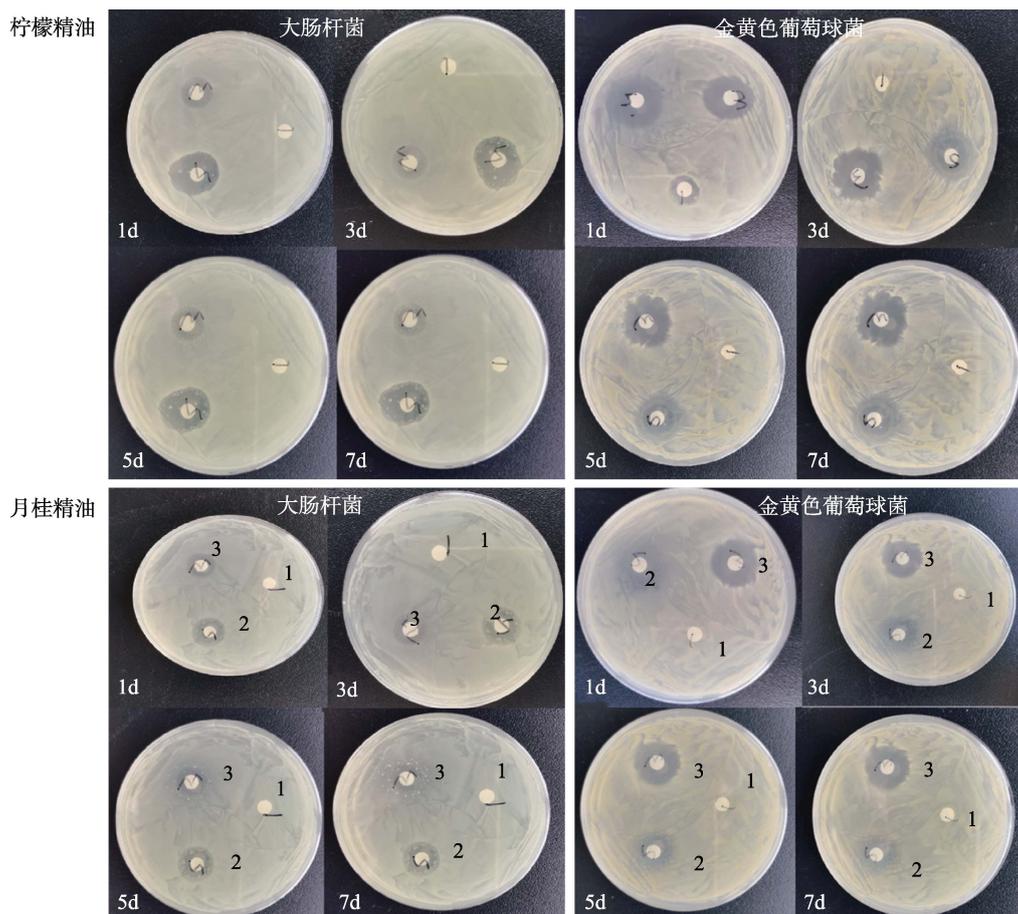


图 6 β -CD、精油和包合物的 DSC 图
 Fig.6 DSC images of β -CD, essential oils, and inclusion complexes

2.6 缓释对 LCEO 及其微胶囊抗菌活性的影响

图 7 显示了精油和微胶囊在不同缓释期抑制的受试菌株的微生物圈大小。在各种缓释时间段内，精油和微胶囊组的抑菌圈直径明显大于空白对照组，表明精油和微胶囊能够有效抑制细菌的生长。对大肠杆菌的抑制作用两种精油表现不同，在月桂精油抑菌圈的大小是精油组的效果优于微胶囊组，而在柠檬精油抑菌圈的大小是微胶囊组的效果优于精油组，差异的原因可能是由于两者成分的不同，柠檬精油的主要成分柠檬烯、柠檬醛，这些物质在微生物表面积累，导致膜中不饱

和脂肪酸含量大量减少，使膜的成分改变或是完整性被破坏，质子动力也可降低，从而达到抑菌作用。月桂精油的主要成分是桉叶油醇、乙酸松油酯、芳樟醇等，通过疏水作用破坏大肠杆菌的细胞形态，抑制细胞功能导致细胞死亡。此外，柠檬精油和月桂精油对于金黄色葡萄球菌的抑制作用经过 3 d 的培养，纯精油处理组的抑菌环明显大于微胶囊组，纯精油的抑制效果优于微胶囊，随着培养时间的延长，微胶囊的抑制作用变得明显，这一区别表明，对于金黄色葡萄球菌微胶囊在抗菌效果方面比纯精油具有更有效和持久的释



注：1 对照组，2 精油组，3 微胶囊组。

Note: 1 control group, 2 essential oil groups, 3 microcapsule groups.

图 7 精油和包合物的抑菌圈图

Fig.7 Antibacterial zone diagram of essential oils and inclusion complexes

放影响。其主要原因可能是 CD 壁材料可以有效降低芯材的挥发速率，并可能持续释放一定量的精油，从而在不同程度上抑制试验菌株的发展。

3 结论

本研究通过共沉淀法制备了柠檬精油和月桂精油与 β -环糊精 (β -CD) 的包合物，并通过扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、X 射线衍射 (XRD) 和热重分析 (TGA) 等技术对所得包合物进行了全面表征。SEM 观察结果显示 β -CD 表现为不规则的块状结构，而包合物的粉末形态呈现为不均匀的多面立方体，FTIR 结果表明精油中的特定化学键在红外光谱中有明确的特征吸收峰，客体分子的嵌入导致其红外光谱信号强度降低，表明分子运动受限。客体分子特征吸收峰的变化证实了与 β -CD 包合物的形成。XRD 分析结果进一步验证了包合物的形

成，精油分子被有效嵌入 β -CD 的内腔，TGA 分析显示，与原始精油相比，包合物展现出更佳的热稳定性，减少了外界环境因素对其可能产生的不利影响，这对于需要经过热处理的应用领域具有一定意义。抑菌实验研究表明， β -CD 是控制精油释放和延长菌株抑制期的合适壁材，不仅显著提升了植物精油的稳定性，还为精油微胶囊在食品加工、制药以及其它相关领域的应用提供了理论依据和技术支持。

参考文献：

- [1] BAI M, LI C, CUI H, et al. Preparation of self-assembling *Litsea cubeba* essential oil/diphenylalanine peptide micro/nanotubes with enhanced antibacterial properties against *Staphylococcus aureus* biofilm[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111394-111407.
- [2] CAO C, WEI D, XU L, et al. Characterization of tea tree essential oil and large-ring cyclodextrins (CD9-CD22)

- inclusion complex and evaluation of its thermal stability and volatility[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(7): 2877-2883.
- [3] WANG Y, YIN C, CHENG X, et al. β -Cyclodextrin inclusion complex containing *Litsea cubeba* essential oil: Preparation, optimization, physicochemical, and antifungal characterization[J]. *Coatings*, 2020, 10(9): 850-867.
- [4] SUN X, CAMERON R G, MANTHEY J A, et al. Microencapsulation of tangeretin in a citrus pectin mixture matrix[J]. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2020, 9(10): 1200-1215.
- [5] BARANAUSKAITE J, KOPUSTINSKIENE D M, BERNA TONIENE J. Impact of gelatin supplemented with gum Arabic, Tween 20, and β -cyclodextrin on the microencapsulation of Turkish oregano extract[J]. *Molecules*, 2019, 24(1): 176-192.
- [6] WEI M Z, XUE S P, XIAO S M. Study on microcapsulation technology of ginger essential oil[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2008, 28(5): 162-170.
- [7] LI T, TENG D, MAO R Y. Recent progress in preparation and agricultural application of microcapsules[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2019, 107(11): 2371-2385.
- [8] LI L, SONG W, SHEN C, et al. Active packaging film containing oregano essential oil microcapsules and their application for strawberry preservation[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 44(12): 14799-14812.
- [9] CHOI M J, RUKTANONCHAI U, MIN S G, et al. Physical characteristics of fish oil encapsulated by β -cyclodextrin using an aggregation method or polycaprolactone using an emulsion-diffusion method[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(4): 1694-1703.
- [10] AIN S, KUMAR B, PATHAK K. Cyclodextrins: versatile carrier in drug formulations and delivery systems[J]. *International Journal of Pharmaceutical Chemistry and Biological Sciences*, 2015, 7(3): 1021-1034.
- [11] FEI P J, XIAO Q C, HONG Z Y, et al. Preparation and spectral properties of inclusion complexes of vitamin E with β -cyclodextrin[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2010, 34(1): 114-124.
- [12] MURA P. Analytical techniques for characterization of cyclodextrin complexes in the solid state: A review[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2015, 113: 226-238.
- [13] HILL L E, GOMES C, TAYLOR T M. Characterization of beta-cyclodextrin inclusion complexes containing essential oils (trans- cinnamaldehyde, eugenol, cinnamon bark, and clove bud extracts) for antimicrobial delivery applications[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 86-93.
- [14] SHRESTHA M, HO T M, BHANDARI B R. Encapsulation of tea tree oil by amorphous beta-cyclodextrin powder[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1474-1483.
- [15] 曹川. 大环糊精制备、结构模拟及其包埋植物精油机理的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- CAO C. Study on the preparation and structural simulation of macrocyclodextrin and its mechanism of embedding plant essential oil[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.
- [16] KRINGEL D H, ANTUNES M D, KLEIN B, et al. Production, characterization, and stability of orange or eucalyptus essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(11): 2598-2605.
- [17] DE OLIVEIRA A L, ALMEIDA E W C, CASTRO H V, et al. Carotenoids and β -cyclodextrin inclusion complexes: Raman spectroscopy and theoretical investigation[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2011, 115(30): 8511-8519.
- [18] GALVAO J G, SILVA V F, FERREIRA S G, et al. β -Cyclodextrin inclusion complexes containing *Citrus sinensis* (L.) Osbeck essential oil: An alternative to control *Aedes aegypti* larvae[J]. *Thermochemica Acta*, 2015, 608: 14-19.
- [19] HARATA K, AKASAKA H, ENDO T, et al. X-ray structure of the δ -cyclodextrin complex with cycloundecanone[J]. *Chemical Communications*, 2002, 18: 1968-1969.
- [20] CAO C, XU L, XIE P, et al. The characterization and evaluation of the synthesis of large-ring cyclodextrins (CD9-CD22) and α -tocopherol with enhanced thermal stability[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(11): 6584-6591. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://llyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。