

芥末-肉桂-大蒜复合精油皮克林乳液的 乳化特性及抑菌活性

段闪¹, 侯旭阳¹, 刘美钊¹, 孔宇¹, 刘常金^{1*}, 张军兵², 江慎华³

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457) (2. 江西丹霞生物科技股份有限公司, 江西鹰潭 335000)
(3. 九江学院药学与生命科学学院, 九江市食品加工与安全重点实验室, 江西九江 332005)

摘要:天然抗菌物质精油有易挥发, 不稳定等缺点, 为了筛选对食源性致病菌具有良好抑菌性的精油且提高其稳定性, 通过测定最小抑菌浓度, 筛选了对食源性致病菌金黄色葡萄球菌、鲍曼不动杆菌和大肠杆菌具有良好抑菌性的三种精油, 之后通过乳糖糖基化乳清分离蛋白-壳聚糖复合物(gWPI-CS)封装了MCGEO(芥末-肉桂-大蒜复合精油)并测试了乳液性质。结果表明, 肉桂、芥末和大蒜精油是对三种病原菌均具有较低的最小抑菌浓度。新制备的皮克林乳液gWPI-CS-EO粒径约为348.10 nm; 包封率为99.85%, 在室温条件下放置7 d, MCGEO包埋率保持在83.00%以上; 电子显微镜图像证实了所制备的乳液的液滴为均匀的球形, 且乳液中油滴分布相对均匀; 抑菌实验表明gWPI-CS-EO在7 d内对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和鲍曼不动杆菌均有生长抑制作用, MCGEO的主要成分为肉桂醛、二烯丙基硫醚和异硫氰酸烯丙酯。研究发现, 皮克林乳液gWPI-CS-EO表现出更好的稳定性和长期抑菌性。研究为开发皮克林乳液来提高精油的抑菌性和缓释性提供了理论依据。

关键词:精油; 抑菌性; 气相色谱-质谱法(GC-MS); 皮克林乳液

文章编号: 1673-9078(2026)5-313-321

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0332

Emulsifying Properties and Antimicrobial Activity of a Mustard-cinnamon-garlic Composite Essential Oil Pickering Emulsion

DUAN Shan¹, HOU Xuyang¹, LIU Meizhao¹, KONG Yu¹, LIU Changjin^{1*}, ZHANG Junbing², JIANG Shenhua³

(1.College of Food Science and Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China) (2.Jiangxi Danxia Biotechnology Co. Ltd., Yingtan 335000, China)(3.School of Pharmacy and Life Science, Jiujiang University, Jiujiang Key Laboratory of Food Processing and Safety, Jiujiang 332005, China)

Abstract: Essential oils are natural antimicrobial agents; however, their high volatility and poor stability limit practical applications in food systems. To identify essential oils with strong antimicrobial activity against foodborne pathogens and to improve their stability, the minimum inhibitory concentrations (MICs) of several essential oils against *Staphylococcus aureus*, *Acinetobacter baumannii*, and *Escherichia coli* were determined. Based on the screening results, a mustard-cinnamon-garlic composite essential oil (MCGEO) was formulated and encapsulated using lactose-glycosylated whey protein isolate and chitosan (gWPI-CS) to construct

引文格式:

段闪,侯旭阳,刘美钊,等.芥末-肉桂-大蒜复合精油皮克林乳液的乳化特性及抑菌活性[J].现代食品科技,2026,42(5): 313-321.

DUAN Shan, HOU Xuyang, LIU Meizhao, et al. Emulsifying properties and antimicrobial activity of a mustard-cinnamon-garlic composite essential oil pickering emulsion [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 313-321.

收稿日期: 2025-03-10; 修回日期: 2025-04-21; 接受日期: 2025-05-01

基金项目: 安徽省抗衰老研究中心开放课题(FSKFKT006)

作者简介: 段闪(1998-),女,硕士研究生,研究方向:农产品物流保鲜与加工, E-mail: duanshan2022@163.com

通讯作者: 刘常金(1969-),男,博士,副教授,研究方向:植物食品保鲜及加工, E-mail: cjliu@tust.edu.cn

a Pickering emulsion. The results indicated that cinnamon, mustard, and garlic essential oils exhibited low MIC values against all three tested pathogens. The freshly prepared gWPI-CS-EO Pickering emulsion had an average particle size of approximately 348.10 nm and an encapsulation efficiency of 99.85%. The retention rate of MCGEO remained above 83.00% after storage at room temperature for 7 days, indicating good stability. Electron microscopy observations revealed uniformly spherical droplets with a relatively homogenous distribution within the emulsion system. Antimicrobial assays demonstrated that gWPI-CS-EO effectively inhibited the growth of *E. coli*, *S. aureus*, and *A. baumannii* over a 7-day period. Gas chromatography-mass spectrometry analysis identified cinnamaldehyde, diallyl sulfide, and allyl isothiocyanate as the major active components of MCGEO. Overall, the gWPI-CS-EO Pickering emulsion exhibited enhanced stability and sustained antimicrobial activity. These findings provide a theoretical basis and technical reference for the application of Pickering emulsions to improve the stability, controlled release, and antimicrobial efficacy of essential oils in food preservation systems.

Key words: essential oil; antimicrobial activity; gas chromatography-mass spectrometry; Pickering emulsion

食源性致病菌，如大肠杆菌 (*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) 和鲍曼不动杆菌 (*Acinetobacter baumannii*) 在日常生活中非常常见，并且容易污染肉类、乳制品、蛋白制品和果蔬等多种食品^[1,2]，在世界范围内引发了高发病率和死亡率，并造成巨大的经济损失^[3]。因此，控制食源性致病菌相关的食品安全问题势在必行。而传统抗生素和化学防腐剂具有细菌耐药性和难以消除的化学残留等诸多问题^[4]。近年来，许多安全且环境友好的抑菌剂，如天然植物提取物^[5]和多糖类物质^[6]，已被广泛开发和用于食品工业中以防治食源性致病菌污染。

植物精油是从芳香植物中提取的亲脂性多元混合物，通常含有萜烯类和芳香类化合物，作为天然抗菌剂具有安全无害、环境清洁等优点^[7]。肉桂精油^[8]、大蒜精油^[9]、芥末精油^[10]都已被证明对腐败微生物具有抗菌活性，可用于抑制食源性致病菌并延长新鲜食品保质期。例如 Liu 等^[11]通过筛选得到了高抑菌活性的肉桂精油和木姜子精油，为精油在食品保鲜中的应用奠定基础。然而，精油的挥发性、不稳定性、水不溶性、以及环境敏感性导致其抑菌性能下降，限制了在食品工业中的应用^[12]。研究表明，可利用封装和缓释的技术来克服精油应用限制并提高抗菌性能^[13]。纳米乳液是装载和包埋精油的最重要的输送系统之一^[14]，已被广泛用于食品等行业^[15]。其中，皮克林乳液是由固体颗粒稳定的一种乳液体系^[16]，可食用固体颗粒代替乳化剂不仅能够提高体系的食用安全性，还可以通过设计颗粒性质来优化皮克林乳液的稳定性和包封效果。近年来，为提高稳定性，多种不同蛋白质改性方法已经被广泛应用于皮克林乳液的封装^[17]，其中美拉德反应是改变了蛋白质的二级结构改性，改性后制备的颗粒包封的乳液体系具有更佳的稳定性^[18]。例如 Zhou 等^[19]通过乳糖糖基化的乳清蛋白交联壳寡糖制备皮克

林乳液，提高了乳液的稳定性和包封性能。

为了筛选对食源性致病菌具有较好抑菌性的植物精油，通过测定最小抑菌浓度 (MIC)，筛选得到了具有较高抑菌性的三种植物精油，并以 GC-MS 法分析了几种精油的主要成分。为了增强复合植物精油缓释性能和抑菌性能，制备了乳糖糖基化乳清蛋白-壳聚糖复合物，并优化了颗粒添加量和油相添加量对乳液粒径和均一性的影响，此外评价了乳液的稳定性和对复合精油的缓释效果，以及皮克林乳液 gWPI-CS-EO 对三种致病细菌长效抑菌性。

1 材料与方法

1.1 试剂与菌种

研究中使用的肉桂精油、大蒜精油和芥末精油、草果精油均购自源叶生物有限公司 (中国天津)；艾叶精油由天津科技大学食品科学与工程学院实验室提取，所有精油储存在 4℃ 备用。壳聚糖、乳清分离蛋白，购自江天化工有限公司 (中国天津)。大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、鲍曼不动杆菌菌种经天津科技大学食品科学与工程系鉴定和保藏。

1.2 主要仪器设备

QP-2010 Ultra 气相色谱-质谱联用仪，日本 SHIMADAZU 公司；X-7S 紫外可见分光光度计，中国元析仪器有限公司；CX40 电子显微镜，中国舜宇有限公司；AD500S-H 高剪切均质器，中国安进仪器有限公司；Bettersize Nano 电位分析仪，中国丹东百特仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 MIC值的测定

MIC 值^[20]的测定按照先前研究中的二倍稀释法略

加修改^[21]。将精油溶于 0.50% TW20 (*V/V*) 中制备成 40 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的母液, 并通过二倍系列稀释将 LB 肉汤 (2 mL) 中的精油体积分数控制 20.00~0.00 98 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。然后, 向每个试管中接种对数生长期的菌悬液 (100 μL , 1×10^7 spores $\cdot\text{mL}^{-1}$)^[22]。试管在 (37 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$ 下培养 48 h。以肉眼未见菌生长浑浊的最低浓度作为精油的 MIC 值。将肉眼未见菌的试管培养基接种到 LB 琼脂固体培养基上, 继续培养 48 h, 以不允许菌落生长的最低浓度作为精油的最小杀菌浓度 (MBC)。

1.3.2 精油的GC-MS分析

将筛选出的三种高抑菌活性精油等体积混合作为复合精油; 为了分析复配前后几种抑菌精油的主要挥发性成分含量与种类, 将精油注入气相色谱仪进行分析。将精油用正己烷稀释, 涡旋混合, 充分溶解。用 0.22 μm 的有机滤膜过滤。稀释后的精油溶液以 1:2 的分流比、1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流量分流注入 0.2 μL 。气相色谱条件为^[23]: HP-5MS 色谱柱 (30 $\text{m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ mm}$); 柱温箱温度程序为: 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 5 min, 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 梯度升温至 120 $^{\circ}\text{C}$, 恒温 5 min, 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 梯度升温至 280 $^{\circ}\text{C}$, 恒温 8 min; 进样口温度 230 $^{\circ}\text{C}$; 检测器温度 280 $^{\circ}\text{C}$ 。载气为氦气, 电离能量为 70 eV。质谱扫描范围为 50~500 u。挥发性化合物的相对含量是通过峰面积归一化方法确定的。根据与对照组分保留时间的比较以及 NIST 02 质谱库中光谱峰的匹配度, 对各个成分进行鉴定。

1.3.3 gWPI-CS复合物的制备

为了延缓精油的释放, 复合精油以皮克林乳液的形式制备和应用, 制备方法参考了 Zhou 等^[19]。简言之, 将质量比为 1:1 的乳清分离蛋白和乳糖溶液 (10%, *m/V*) 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下磁力搅拌 2 h, 调节 pH 值至 7.0, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下过夜水合, 3 000 $\times g$ 离心 10 min 除去沉淀, 取上清液冻干, 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h, 制得 gWPI 粉末备用。之后, 将 gWPI (1%, *m/V*) 加入去离子水中并充分混合, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下放置过夜, 然后加入壳聚糖 (1%, *m/V*) 并搅拌 2 h, 调节 pH 值至 5.0 后过夜复合, 得到 gWPI-CS 复合物; 同理可得到不同质量分数的复合物溶液。

1.3.4 负载复合精油的皮克林乳液的制备

将芥末、肉桂、大蒜精油等体积混合作为复合精油 MCGEO, 油相的制备是将 MCGEO 与大豆油 (体积比 1:4) 充分混匀。将 gWPI-CS 水溶液在室温下搅拌 4 h 后, 然后加入到水相中, 用高剪切均质器以 10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 均质化 2 min, 并用高压均质机在 30 MPa 下均质 1 次, 得到负载复合精油 MCGEO 的皮克林乳液, 命名为 gWPI-CS-EO。其他颗粒物包封的乳液制

备方法与上述颗粒方法相同。

1.3.5 负载MCGEO的皮克林乳液的表征

1.3.5.1 乳液的外观

为了获得样品贮藏期间 (0、7 和 14 d) 外观变化的数据, 将制备的乳液置于 20 mL 玻璃样品瓶中, 并将多个样品储存并在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下分别连续观察, 期间拍照记录外观。

1.3.5.2 形态学观察

为了获得样品贮藏期间 (0、7 和 14 d) 微观形态变化, 使用光学显微镜检查所得乳液的形态。将制备的样品放在带有盖玻片的显微镜载玻片上, 用 10 $\times$ 40 物镜观察并拍照。

1.3.5.3 贮藏稳定性

为了评价乳液在贮藏过程中 (0、3、6、9、12 和 15 d) 的粒径变化, 通过粒径和 zeta 电位分析仪确定乳液的液滴大小和 PDI^[24]。

1.3.5.4 缓释性能

为测定在储存期间 (0、2、4、6、8、10、12 和 14 d) MCGEO 的缓释性能, 参考 Liu 等^[25]描述的超声辅助方法测定乳液中的未挥发油量, 所有不同贮存期的皮克林乳液首先用 $\phi=95\%$ 乙醇稀释, 并超声 (400 W, 30 min) 以破坏液滴。离心 (8 000 $\times g$) 5 min 后, 收集上清液并稀释后待测。扫描 MCGEO-乙醇全波长扫描后确定其特征峰^[26], 使用紫外可见分光光度计在特征峰 286 nm 进行分析。以 MCGEO-乙醇标准曲线 ($y=60.91x-1.185\ 2$, $R^2=0.998\ 1$) 计算上清液中 MCGEO 的质量分数。按下式计算乳液中 MCGEO 的包封效率 (%) :

$$EE = \frac{X_0}{X_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

EE——包封效率, %;

X_0 ——未挥发油量, $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$;

X_1 ——总添加量, $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.3.5.5 抑菌性能

为了评估负载 MCGEO 的皮克林乳液的抗菌特性, 测定了 3 种病原细菌 (大肠杆菌, 金黄色葡萄球菌, 鲍曼不动杆菌) 在不同乳液体积分数下的时间生长曲线。参考 Bai 等^[1]描述的方法测定, 将 1.8 mL 细菌细胞 (1×10^6 CFU/mL) 与不同体积的乳液混合, 使体系中的乳液最终体积分数分别达到 12.50%、25.00% 和 50.00% (*V/V*)。将试管在 37 $^{\circ}\text{C}$, 150 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床中孵育。然后在规定的间隔时间分别收集混合溶液, 并测定 600 nm 处的吸光度。以不含细菌的精油溶液作为空白对照。

1.4 数据处理

研究的所有实验均重复三次，数据以平均值 ± 标准差表示^[27]。数据使用 SPSS（20.0）软件进行分析。部分图表使用 Origin Lab（2021）软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 五种植物精油抗菌效果比较及筛选

表 1 结果表明，芥末精油对三种细菌的在五种精油中均达到了最低，芥末精油对 *E. coli*、*S. aureus* 和 *A. baumannii* 的 MIC 值分别为 0.31、0.31 和 1.25 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。此外，肉桂精油和大蒜精油分别对 *E. coli* 和 *A. baumannii* 有着最小的 MBC，分别为 2.50 和 5.00 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，因此，选用了这三种具有较高抑菌活性的精油进行应用。

芥末精油和大蒜精油对三种菌的协同抑菌效果更好，这可能归因于含硫有机化合物具有有效的抗菌特性。Manish 等^[28]研究了二烯丙基硫醚（DAS）对常见食源性致病菌蜡样芽孢杆菌的抑菌活性，结果表明 DAS 对蜡样芽孢杆菌的 MIC 值为 54.75 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Susweta 等^[29]的研究表明，大蒜精油乳液具有最高的

抗耐甲氧西林金黄色葡萄球菌活性。之前的研究认为，烯丙基甲基二硫化物和二甲基三硫化物会导致大肠杆菌失活^[30]。除二烯丙基硫化物外，异硫氰酸烯丙酯（AITC）也是一种潜在的抗菌剂，可防止食品变质，Hajime 等^[31]对 AITC 的抗菌活性进行了研究，AITC 对六种乳酸菌的 MIC 值低至 2.00 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。AITC 也是十字花科蔬菜的主要成分，具有很高的抗真菌活性^[32]。因此，复合精油的良好抗菌效果可能与多种含硫化合物的共同作用有关。

表 1 五种精油对食源性病原菌的MIC和MBC
Table 1 MIC and MBC of five essential oils against three pathogens

	<i>Escherichia coli</i> (G-)		<i>Staphylococcus aureus</i> (G+)		<i>Acinetobacter baumannii</i> (G-)	
	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
芥末精油	0.31	10.00	0.31	2.50	1.25	10.00
肉桂精油	1.25	2.50	2.50	5.00	2.50	10.00
大蒜精油	10.00	10.00	10.00	10.00	5.00	5.00
艾叶精油	2.50	10.00	5.00	20.00	—	20.00
苹果精油	—	—	—	—	—	—

注：MIC：最小抑菌浓度， $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ ；MBC：最小杀菌浓度， $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ ；G+：革兰氏阳性细菌；G-：革兰氏阴性细菌。

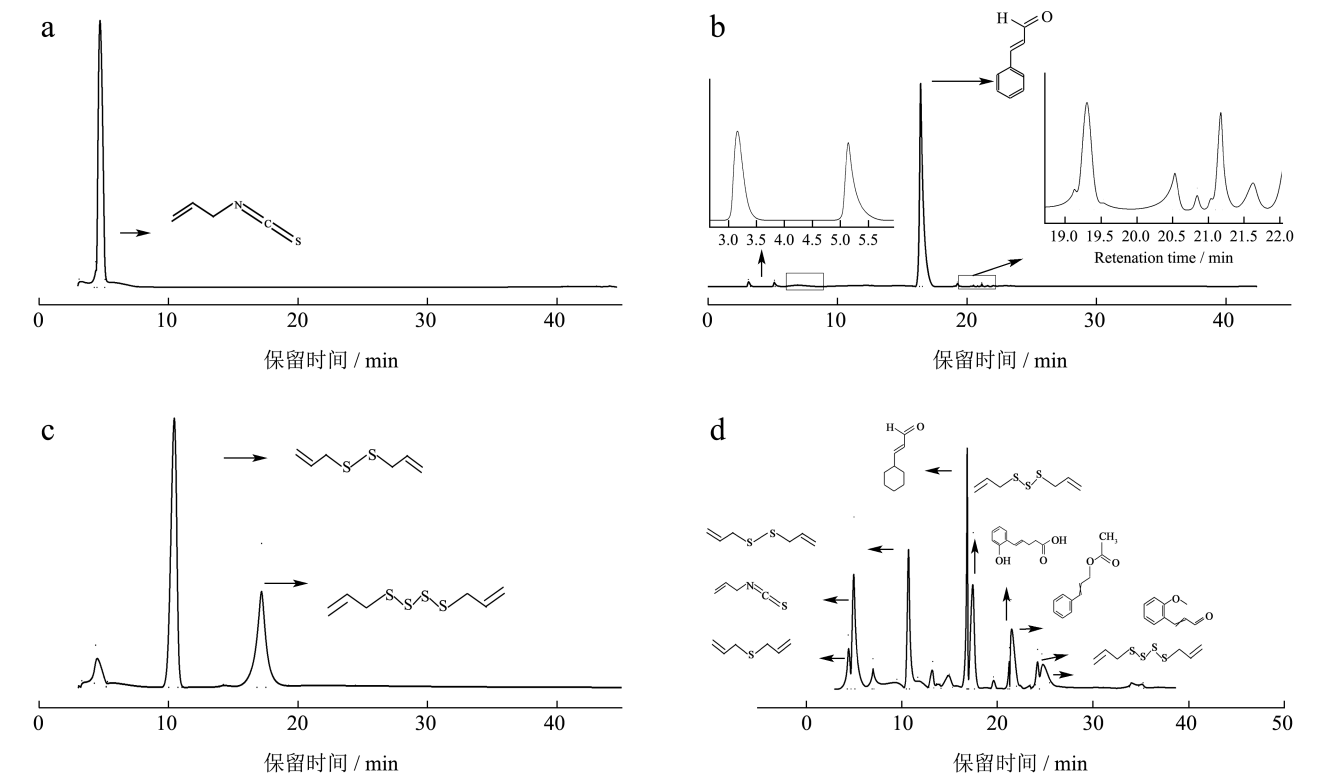


图 1 不同精油中的 GC-MS 质谱离子图及其主要化学成分结构式

Fig.1 GC-MS and structural formulas of different essential oils

注：（a）芥末精油；（b）肉桂精油；（c）大蒜精油；（d）复合精油。

2.2 精油的GC-MS分析

通过 GC-MS 法测定了芥末、大蒜、肉桂和复合精油 MCGEO 的成分。结果见图 1 和表 2。从图 1 中可知，肉桂醛、二烯丙基二硫化物和 AITC 分别是肉桂、大蒜和芥末精油中的主要活性物质，而肉桂醛、大蒜二硫化物和 AITC 依旧是复配后精油主要成分（图 1d），含硫化合物是复配精油 MCGEO 中最常见的成分（表 2），包括 AITC（9.55%）、二烯丙基二硫醚（12.37%）、二烯丙基硫醚（1.62%）、二烯丙基三硫醚（6.63%）、二烯丙基四硫醚（1.79%）。复合精油

中共含有 49 种成分，占精油总峰面积的 98.37%。

精油复配后，化合物种类也有明显增多，出现了构象变化产生的异构体，如复合精油中的 2-羟基肉桂酸（1.64%）、邻甲氧基肉桂醛（2.00%）和肉桂醇（0.04%）。复合精油协同抗菌效果的增强可能与精油主要成分的变化和有机化合物种类的增加有关。Hu 等^[33]制备了肉桂、丁香牛至复合精油，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的的 MIC 值低于 7.94 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，主要成分为肉桂醛、香芹酚和丁香酚，肉桂醛可能是这两种细菌的潜在抑菌活性成分。

表 2 复合植物精油MCGEO的GC-MS成分表

Table 2 GC-MS Composition of composite essential oil MCGEO						
序号	组分	保留时间/min	CAS	分子式	保留指数	相对含量 /%
1	二烯丙基硫醚	4.38	592-88-1	C ₆ H ₁₀ S	849	1.62
2	异硫氰酸烯丙酯	4.64	1957-6-7	C ₄ H ₃ NS	0	1.00
3	异硫氰酸烯丙酯	5.00	1957-6-7	C ₄ H ₃ NS	0	8.55
4	水杨醛	9.49	1990-2-8	C ₇ H ₆ O ₂	1 203	0.32
5	苯乙酮	10.23	98-86-2	C ₈ H ₈ O	1 029	0.02
6	二烯丙基二硫醚	10.73	2179-57-9	C ₆ H ₁₀ S ₂	1 099	12.37
7	苯乙醇	11.68	1960-12-8	C ₈ H ₁₀ O	1 136	0.38
8	2-甲基苯并呋喃	12.68	4265-25-2	C ₉ H ₈ O	1 107	0.04
9	肉桂醇	12.83	104-54-1	C ₉ H ₁₀ O	1 243	0.04
10	3-苯丙醛	13.24	104-53-0	C ₉ H ₁₀ O	1 181	0.86
11	左旋龙脑	13.36	464-45-9	C ₁₀ H ₁₈ O	1 138	0.16
12	3-ethenyl-3,6-dihydrodithiine	13.64	62488-52-2	C ₆ H ₈ S ₂	1 134	0.23
13	α -松油醇	14.01	98-55-5	C ₁₀ H ₁₈ O	1 143	0.02
14	3-vinyl-4H-1,2-dithiin	14.12	62488-53-3	C ₆ H ₈ S ₂	1 134	0.66
15	肉桂醛	14.76	104-55-2	C ₉ H ₈ O	1 189	0.56
16	3-苯丙醇	14.99	122-97-4	C ₉ H ₁₂ O	1 235	0.09
17	邻甲氧基苯甲醛	15.31	135-02-4	C ₈ H ₈ O ₂	1 171	0.16
18	乙酸苯乙酯	15.69	103-45-7	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1 259	0.08
19	肉桂醛	16.12	104-55-2	C ₉ H ₈ O	1 189	53.65
20	二烯丙基三硫醚	16.83	2050-87-5	C ₆ H ₁₀ S ₃	1 350	6.63
21	3-苯丙酸	17.48	501-52-0	C ₉ H ₁₀ O ₂	1 349	0.03
22	丁香酚	18.26	97-53-0	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1 392	0.04
23	(+) - 环苜蓿烯	19.01	22469-52-9	C ₁₅ H ₂₄	1 125	0.01
24	邻甲氧基苯丙酮	19.33	5211-62-1	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1 318	0.07
25	(-) - α -蒎烯	19.42	3856-25-5	C ₁₅ H ₂₄	1 221	0.38
26	β -波旁烯	19.87	5208-59-3	C ₁₅ H ₂₄	1 339	0.02
27	β -榄香烯	20.02	515-13-9	C ₁₅ H ₂₄	1 398	0.02
28	2-羟基肉桂酸	21.27	614-60-8	C ₉ H ₈ O ₃	1 577	1.64

续表2

序号	组分	保留时间/min	CAS	分子式	保留指数	相对含量/%
29	乙酸桂酯	21.41	103-54-8	C ₁₁ H ₁₂ O ₂	1 367	3.27
30	香树烯	21.99	25246-27-9	C ₁₅ H ₂₄	1 386	0.08
31	γ-木犀烯	22.43	30021-74-0	C ₁₅ H ₂₄	1 435	0.13
32	α-姜黄烯	22.56	644-30-4	C ₁₅ H ₂₂	1 524	0.06
33	反式石竹烯	22.68	87-44-5	C ₁₅ H ₂₄	1 494	0.02
34	β-瑟琳烯	22.80	17066-67-0	C ₁₅ H ₂₄	1 469	0.01
35	(-)-α-木犀烯	23.19	10208-80-7	C ₁₅ H ₂₄	1 440	0.07
36	β-红没药烯	23.42	495-61-4	C ₁₅ H ₂₄	1 500	0.16
37	γ-木犀烯	23.69	30021-74-0	C ₁₅ H ₂₄	1 435	0.09
38	Δ-杜松烯	23.99	483-76-1	C ₁₅ H ₂₄	1 469	0.18
39	邻甲氧基肉桂醛	24.20	1504-74-1	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	1 378	2.00
40	二烯丙基四硫醚	24.64	2444-49-7	C ₆ H ₁₀ S ₄	1 601	1.79
41	反式-橙花叔醇	25.45	40716-66-3	C ₁₅ H ₂₆ O	1 564	0.28
42	桉油烯醇	26.21	6750-60-3	C ₁₅ H ₂₄ O	1 536	0.12
43	石竹素	26.47	1139-30-6	C ₁₅ H ₂₄ O	1 507	0.15
44	十四烷醛	27.30	124-25-4	C ₁₄ H ₂₈ O	1 601	0.03
45	苯甲酸苄酯	31.06	120-51-4	C ₁₄ H ₁₂ O ₂	1 733	0.04
46	植酮	32.36	502-69-2	C ₁₈ H ₃₆ O	1 754	0.02
47	苯甲酸苯乙酯	32.61	94-47-3	C ₁₅ H ₁₄ O ₂	1 833	0.02
48	芮木泪柏烯	33.82	1686-67-5	C ₂₀ H ₃₂	1 926	0.05
49	抗坏血酸二棕榈酸酯	33.97	28474-90-0	C ₃₈ H ₆₈ O ₈	4 765	0.15

2.3 乳液的制备与评价

2.3.1 乳液的粒径和形态变化

gWPI-CS-EO 纳米乳液的形态如图 2 所示。经过高剪切均质处理后，得到的新鲜乳液液滴呈球形，体系分散均匀（图 2b），此时的微乳球表面能最小，这是皮克林乳状液的共同特征。随着乳清蛋白和壳聚糖颗粒交联物的形成，乳状液液滴在新鲜乳状液体系中的均匀性增强。随着贮存时间的延长，乳状液稳定性下降，液滴有不同程度聚集的趋势。相比之下，以 gWPI-CS 复合物制备的皮克林乳液在保存 14 天仍然保持了乳液液滴的均匀性和分散性（图 2c）。具有较强的界面力和稳定的乳化结构能够有效缓释精油^[19]，所形成的乳液体系更为稳定。Liu 等^[22]通过制备壳聚糖-碱木质素复合物皮克林乳液包埋了柠檬精油，结果显示 0.50% 颗粒添加量的乳液稳定性最佳，并且体现出了对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的显著抑制作用。皮克林乳液封装精油在活性抑菌包装具有广泛应用前景。

2.3.2 颗粒添加量和油相添加量对乳液性质的影响

为研究 gWPI-CS 颗粒的含量和 MCGEO 含量对所得皮克林乳液的乳化性能和稳定性的影响，制备并分析了经不同质量分数 gWPI-CS 复合物稳定的不同体积分数 MCGEO 的乳液。如图 3a 所示，所有由 gWPI-CS 复合物稳定的皮克林乳液的多分散指数随着 gWPI-CS 复合物含量的增加呈现降低趋势，乳液的液滴尺寸减小，大液滴变少，表明乳化性能随着 gWPI-CS 复合物含量的增加而得到提升。这可能归因于复合物的稳定交联作用，先前的研究介绍，糖基化乳清分离蛋白和壳寡糖的交联机制是 gWPI 网络空间位阻效应形成的致密界面层和连续相^[19]。随着油相的添加量改变，体系的粒径会出现波动，Li 等^[34]制备壳聚糖精油皮克林乳液并评价，当颗粒质量分数从 1.00% 增加到 2.00% 时，添加的颗粒的量与皮克林乳液的液滴尺寸呈负相关，但多分散指数上升；而由图 3b 可知，体系的粒径在油相质量分数为 4.00% 和 8.00% 时最低，并且在 8.00% 时的多分散指数较低，体系较为均一，综上，选用质量分数 1.25% 颗粒添加量封装 8.00% 油相的体系进行进一步评价。

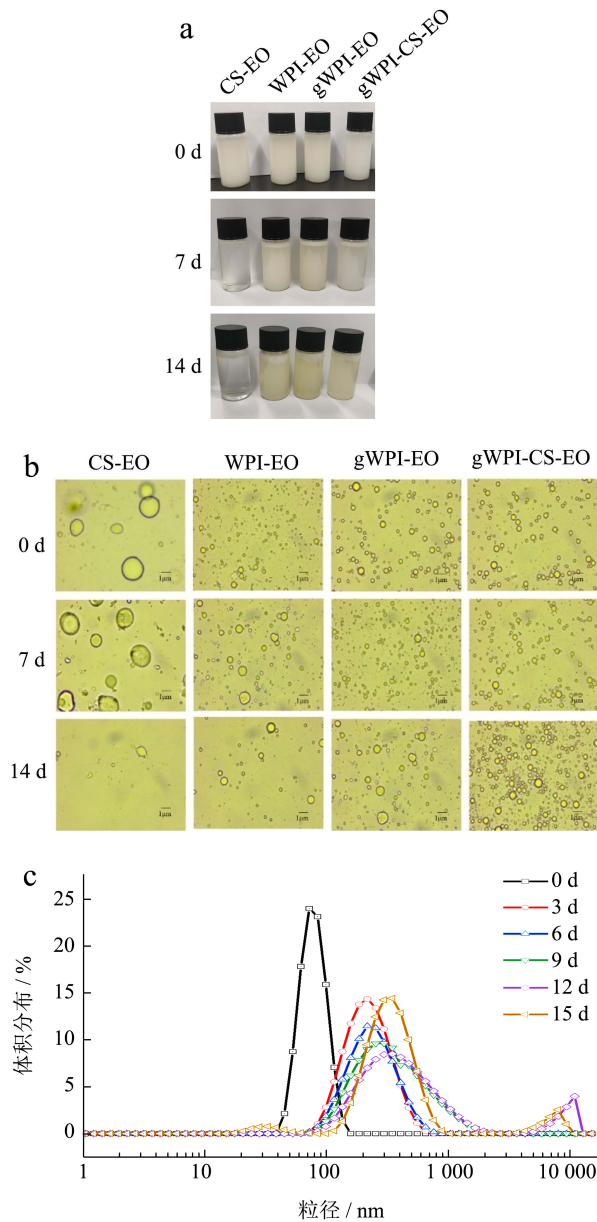


图 2 贮藏期间不同颗粒物封装精油的性质变化
Fig.2 Character changes of essential oils encapsulated with different particles during storage

注: (a) 视觉; (b) 微观形态; (c) gWPI-CS-EO 粒径。

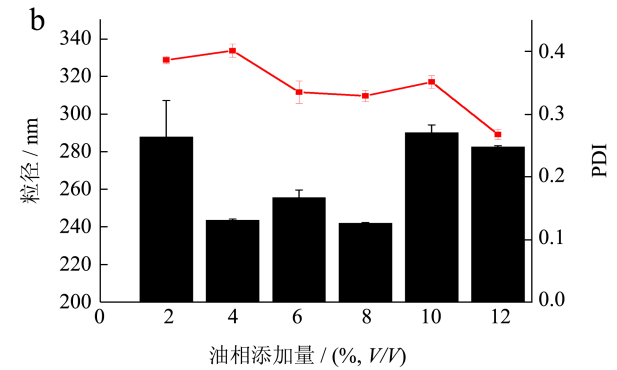
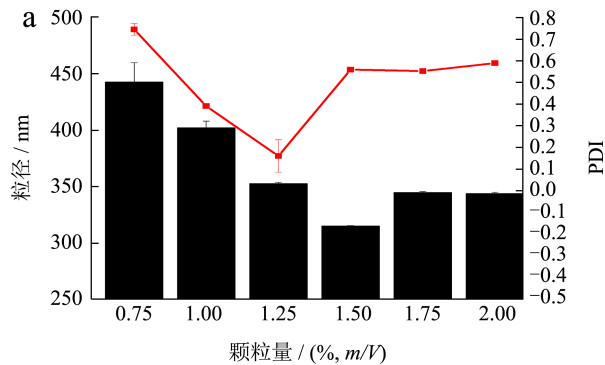


图 3 不同复合物配比包埋的精油复合物的粒径和分散指数变化
Fig.3 Changes in particle size and polydispersity index of different essential oils encapsulated with different compound ratio
注: (a) 颗粒物的质量分数; (b) 精油的体积分数。

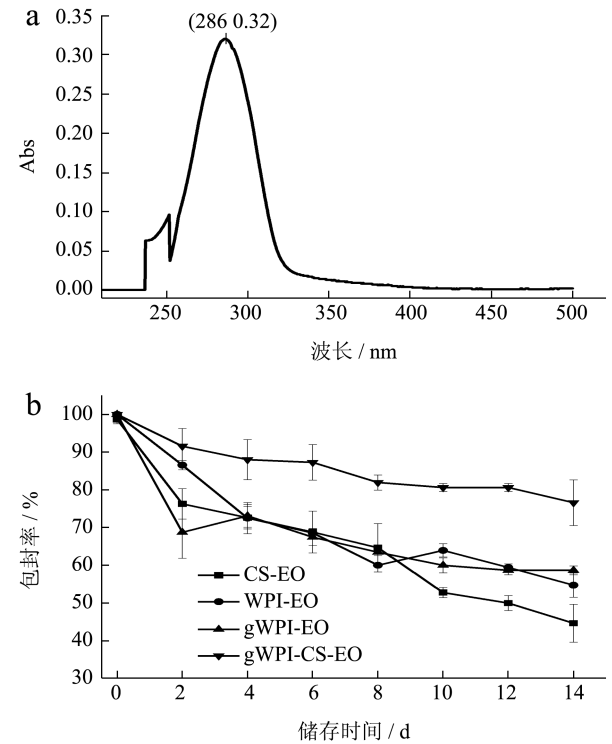


图 4 包封在皮克林乳液中的 MCGEO 的稳定性
Fig.4 Stability of MCGEO encapsulated by Pickering emulsion

注: (a) MCGEO 的全波长扫描曲线; (b) 不同颗粒物包封的皮克林乳液中 MCGEO 的包封率。

2.3.3 不同复合物对MCGEO的包封率

经过全波长扫描, 发现在 200~500 nm 之间, MCGEO 的乙醇溶液在 286 nm 处具有特征峰 (图 4a), 因此通过在 286 nm 处测定乳液体系中精油的浓度和包埋率, 结果如图 4。图 4b 显示了分别由 CS、WPI、gWPI 和 gWPI-CS 复合物包封的四种皮克林乳液中复合精油 MCGEO 的包封率。在储存期的前半段 (0~7 d),

gWPI-CS-EO 中 10.00%~15.00% 的 MCGEO 释放到空气中,在 7~14 d 内释放率增加到 15.00%~25.00% 左右。在所有复合物中, gWPI-CS 和 gWPI 能明显延缓复合精油 MCGEO 释放。在储存期结束时,以 CS 包埋的复合精油释放率为 55.43%,以 gWPI 包埋的复合精油释放率为 42.34%,而以 gWPI-CS 包埋的复合精油释放率为 23.39%,复合物 gWPI-CS 对复合精油释放的缓释作用优于另外三种。复合精油释放百分比随储存时间的增加,这可能是由于随着存储期延长乳液的稳定性变差,从而导致精油包封率降低,因此体系的稳定有助于延缓精油的扩散。

2.3.4 复合精油皮克林乳液的抑菌性能

图 5 显示,不同处理的 OD₆₀₀ 值呈时间依赖性增加,培养至 4 h 时金黄色葡萄球菌(图 5b)和鲍曼不动杆菌(图 5c)进入对数生长期。而在 gWPI-CS-EO 体积分数为 25.00% 和 50.00% 的处理组孵育时间 24 h 内,鲍曼不动杆菌的 OD₆₀₀ 值几乎没有增加。此外与不加精油的对照组相比, gWPI-CS-EO 体积分数为 12.50% 的处理孵育 20 h 后可使大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长光密度分别降低 0.53 和 0.77。体积分数为 50.00% 的 gWPI-CS-EO 处理孵育 24 h 后,大肠杆菌和金黄色葡萄球菌 OD₆₀₀ 分别下降 2.36、2.92。结果表明, MCGEO 乳液能在较低浓度下有效抑制鲍曼不动杆菌,同时在较高浓度下有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长。乳液 gWPI-CS-EO 具有控制鲍曼不动杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌引起的食源性疾病的应用前景。

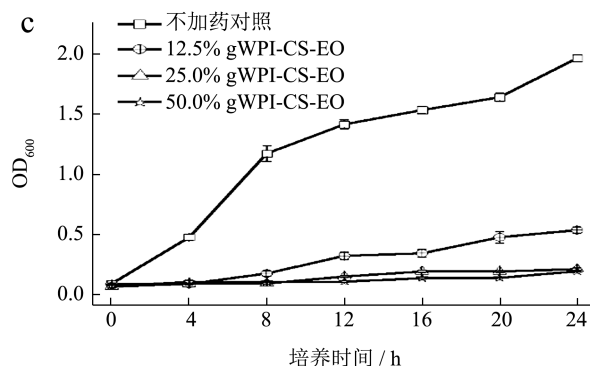
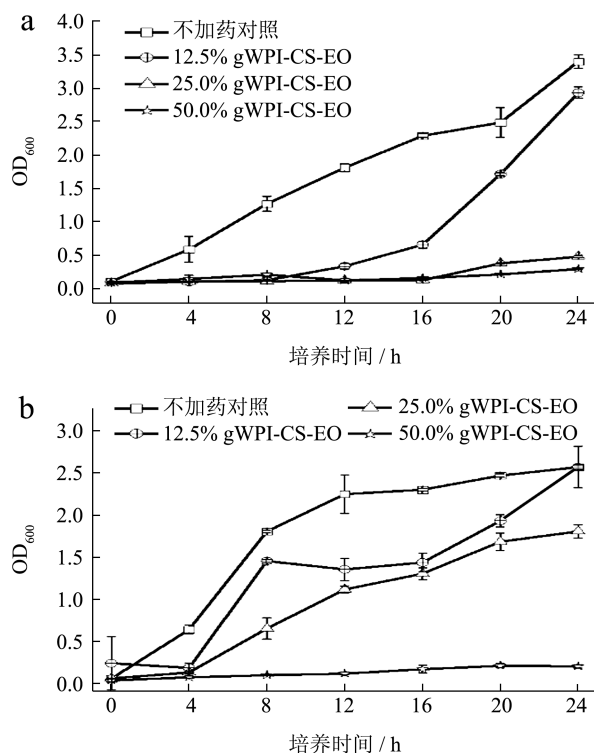


图 5 不同体积分数的 gWPI-CS-EO 对细菌的时间杀菌曲线

Fig.5 Time killing curves of different concentrations of gWPI-CS-EO against bacteria

注:(a) 大肠杆菌;(b) 金黄色葡萄球菌;(c) 鲍曼不动杆菌。

3 结论

经筛选,芥末精油、肉桂精油、大蒜精油对于三种食源性致病菌都具有高抑菌性, MIC 值和 MBC 值低于 $10.00 \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$, 而草果精油和艾叶精油在 $10.00 \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度内的抑菌性较差,这可能与芥末精油和大蒜精油中含有较多的含硫化合物有关;对复合精油乳液的缓释和抑菌性能评价的结果表明,乳糖糖基化改性的乳清蛋白交联的壳聚糖的乳化作用增强了 gWPI-CS 的包埋效率和稳定性。稳定性的提高主要归因于液滴的均匀、分散性。用质量分数 1.25% 颗粒添加量包封 8.00% 油相,复合精油的初始包埋率达到了 98.67%,在室温条件下放置 7 d, MCGEO 包埋率保持在 83.00% 以上,同时,抑菌实验表明, 50.00% 浓度的 gWPI-CS-EO 精油纳米乳液在 7 d 内对鲍曼不动杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均有生长抑制作用。研究发现,相对比于纯精油,精油纳米乳液表现出更好的稳定性和长期抑菌性。基于此,通过构建可食性皮克林乳液,实现精油的挥发性抑菌活性物质在乳液中的调控释放,达到对三种食源性致病菌的长期生长抑制效果,为扩大 MCGEO 在食品保鲜领域的应用提供了科学依据。

参考文献

- [1] BAI J, LI J, CHEN Z, et al. Antibacterial activity and mechanism of clove essential oil against foodborne pathogens [J]. LWT- Food Science and Technology, 2023, 173: 114249.
- [2] 闫彦君,张友慧,高凤,等.豆腐皮常温贮藏过程中菌相变化及优势菌致病性分析[J].食品工业科技.2023,44(19):140-149.
- [3] CUI H, BAI M, SUN Y, et al. Antibacterial activity and mechanism of Chuzhou chrysanthemum essential oil [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 48: 159-166.
- [4] 张鹏宇,李金月,郭婷婷,等.CRISPR-Cas1对鲍曼不动杆菌耐药性

- 与毒力的抑制作用[J].微生物学报,2025,65(2):671-682.
- [5] JIAO M, KONG W, LIU W, et al. Boosting the antibacterial potency of natural products through nanotechnologies [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2025, 674: 125437.
- [6] HE M, HUANG Y, WANG J, et al. Advances in polysaccharide-based antibacterial materials [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 308: 142598.
- [7] ZOHREH A M, YEGANEH M, ALIEH R S, et al. The significance of essential oils and their antifungal properties in the food industry: a systematic review [J]. Heliyon, 2023, 9(11): e21386.
- [8] ZHANG W, PARYA E, AJAHAR K, et al. Encapsulation and delivery systems of cinnamon essential oil for food preservation applications [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2023, 318: 102965.
- [9] MURUGESAN S, VALLAVAN R, COIMBATORE A A, et al. Nanoencapsulation of garlic essential oil using chitosan nanopolymer and its antifungal and anti-aflatoxin B1 efficacy *in vitro* and *in situ* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 243: 125160.
- [10] YANG Z, GUAN C, ZHOU C, et al. Amphiphilic chitosan/carboxymethyl gellan gum composite films enriched with mustard essential oil for mango preservation [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 300: 120290.
- [11] LIU Y, WANG R, ZHAO L, et al. The antifungal activity of cinnamon-litsea combined essential oil against dominant fungal strains of moldy peanut kernels [J]. Foods, 2022, 11(11): 1586.
- [12] SHASANK S S, SUDHIR K P, RABINDRA N P, et al. Nano-technology platforms to increase the antibacterial drug suitability of essential oils: a drug prospective assessment [J]. Opennano, 2023, 9: 100115.
- [13] ZHU Y, LI C, CUI H, et al. Encapsulation strategies to enhance the antibacterial properties of essential oils in food system [J]. Food Control, 2021, 123: 107856.
- [14] AMIT K, ROHINI K, S K M. Nanoemulsion as an effective delivery vehicle for essential oils: properties, formulation methods, destabilizing mechanisms and applications in agri-food sector [J]. Next Nanotechnology, 2025, 7: 100096.
- [15] GHUMIKA P, CAROLINA K D S, MARCEL J G, et al. Recent progress on Pickering emulsion stabilized essential oil added biopolymer-based film for food packaging applications: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269: 132067.
- [16] CHENG Y, CAI X, ZHANG X, et al. Applications in Pickering emulsions of enhancing preservation properties: current trends and future prospects in active food packaging coatings and films [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 151: 104643.
- [17] ZHANG S, HE Z, XU F, et al. Enhancing the performance of konjac glucomannan films through incorporating zein-pectin nanoparticle-stabilized *Oregano* essential oil Pickering emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107222.
- [18] PAN Y, WU Z, XIE Q, et al. Insight into the stabilization mechanism of emulsions stabilized by Maillard conjugates: protein hydrolysates-dextrin with different degree of polymerization [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105347.
- [19] ZHOU L, LIU Y, LI Y, et al. Pickering emulsion stabilized by glycosylated whey protein isolate complexed with Chitooligosaccharide for the improving stability of delivery and bioaccessibility of DHA [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109858.
- [20] CHENG Y, LIN Y, CAO H, et al. Citrus postharvest green mold: recent advances in fungal pathogenicity and fruit resistance [J]. Microorganisms, 2020, 8(3): 449.
- [21] BHANU P, PRASHANT K M, AKASH K, et al. Antifungal, antiaflatoxin and antioxidant potential of chemically characterized *Boswellia carterii* Birdw essential oil and its *in vivo* practical applicability in preservation of *Piper nigrum* L. fruits [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(2): 240-247.
- [22] LIU L, SIMON S, CHERIE T, et al. Antimicrobial and antioxidant AIE chitosan-based films incorporating a Pickering emulsion of lemon myrtle (*Backhousia citriodora*) essential oil [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107971.
- [23] GHAVAM M. GC-MS analysis and antimicrobial activities of a *Rosmarinus officinalis* L. essential oil from Kashan Region (Iran) [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2022, 105: 104507.
- [24] LI D, JIANG Y, SHI J. Novel Pickering emulsion stabilized by Glycosylated whey protein isolate: characterization, stability, and curcumin bioaccessibility [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101186.
- [25] LIU T, CHEN Y, ZHAO S, et al. The Sustained-release mechanism of citrus essential oil from cyclodextrin/cellulose-based Pickering emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109023.
- [26] 黄安莉,姚刚,朱月,等.复方玫瑰抗焦虑纳米微胶囊香水的制备及评价[J].山东化工,2024,53(15):20-23.
- [27] RUIMEI L, LAISE R S, ARUN S, et al. The relationship between cell wall and postharvest physiological deterioration of fresh produce [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 210: 108568.
- [28] MANISH K M, PRACHI C, CHANDRAMA P U, et al. Mechanism of antibacterial activity of diallyl sulfide against *Bacillus cereus* [J]. Journal of Ayurveda and Integrative Medicine, 2024, 15(3): 100951.
- [29] SUSWETA D M, S S, N H, et al. Essential oil and phytoconstituent (Linalool) from *Homalomena aromatica* Schott. rhizomes exhibit antibacterial and synergistic effects with beta-lactam antibiotics against Carbapenem-resistant Enterobacteriaceae (CRE) and Methicillin Resistant *S. aureus* (MRSA) pathogens [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 198: 116666.
- [30] WU C, WANG C, SUN G, et al. Antibacterial characteristics of allyl methyl disulfide and dimethyl trisulfide of *Allium tenuissimum* flower essential oil against *Escherichia coli* O157:H7 [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 202: 117058.
- [31] HAJIME T, AYAKA N, NANAMI F, et al. Evaluation of the antibacterial activity of allyl isothiocyanate, clove oil, eugenol and carvacrol against spoilage lactic acid bacteria [J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 145: 111263.
- [32] MANYES L, LUCIANO F B, MAÑES J, et al. *In vitro* antifungal activity of allyl isothiocyanate (AITC) against *Aspergillus parasiticus* and *Penicillium expansum* and evaluation of the AITC estimated daily intake [J]. Food and Chemical Toxicology, 2015, 83: 293-299.
- [33] HU J, ZHU H, FENG Y, et al. Emulsions containing composite (clove, oregano, and cinnamon) essential oils: phase inversion preparation, physicochemical properties and antibacterial mechanism [J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136201.
- [34] LI H, LIU M, HAN S, et al. Edible chitosan-based Pickering emulsion coatings: preparation, characteristics, and application in strawberry preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264(2): 130672.