

油凝胶改善二氧化硅颗粒薄荷醇的吸附性能

魏玉磊¹ 郭 鹏¹ 高 云¹ 刘 群¹ 张豪洋¹ 邹立强²

(1. 山东中烟工业有限责任公司, 山东 济南 250100;

2. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西 南昌 330047)

摘要: [目的] 改善二氧化硅的薄荷醇吸附性能。[方法] 采用二氧化硅吸附熔融薄荷醇油凝胶制备附香颗粒, 探究棕榈油的添加比例对油凝胶硬度、保油率、热力学特性的影响。对比附香颗粒的微观形态、流动性能及其负载薄荷醇的包封率、贮藏稳定性和释放特性, 并评价油凝胶对二氧化硅颗粒的吸附性能改善作用。[结果] 当棕榈油添加量为 50%, 80% 时, 油凝胶保油率均在 90% 以上, 油凝胶的硬度和熔融峰值温度随棕榈油比例的提高而增大。微观结果显示, 附香颗粒表面有油凝胶附着, 薄荷醇包封率由 73.43% 提高至 82.05% 和 91.19%, 贮藏终点包封率由 30.77% 提高至 69.83% 和 80.28%, 且有效改善了薄荷醇的缓释性能。[结论] 油凝胶能有效改善二氧化硅颗粒的薄荷醇吸附性能。

关键词: 油凝胶; 薄荷醇; 二氧化硅颗粒; 包封率; 缓释

Study on improving menthol adsorption performance of silica particles by olege

WEI Yulei¹ GUO Peng¹ GAO Yun¹ LIU Qun¹ ZHANG Haoyang¹ ZOU Liqiang²

(1. China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China)

Abstract: [Objective] To improve the menthol adsorption properties of silica. [Methods] Fragrance-absorbing particles were prepared using silica adsorption-melted menthol oleogel. The impact of palm oil addition ratio on the oleogel hardness, oil binding capacity, and thermodynamic properties was investigated. Comparative particles microstructure, flow properties, and the loaded menthol encapsulation efficiency, storage stability and release characteristics to assess the enhancement of silica particle adsorption properties by the oleogel. [Results] When palm oil addition ratio were 50% and 80%, the oil binding capacity of oleogels were over 90%, and the hardness and peak melting temperature of the gels increased with the palm oil ratio. Microscopic observations revealed the adsorption of oleogels on the surface of silica particles. Encapsulation efficiency of menthol increased from 73.43% to 82.05% and 91.19%, while storage endpoint encapsulation efficiency rose from 30.77% to 69.83% and 80.28%. Concurrently, menthol sustained-release properties were enhanced. [Conclusion] Oleogel effectively improves the adsorption properties of silica particles for menthol.

Keywords: oleogel; menthol; silica particles; encapsulation efficiency; sustained-release

薄荷醇是一种环状单萜醇, 具有薄荷的怡人香气和凉爽的吸入或食用体感, 同时兼具抗炎、抑菌、止痒镇痛、抗疲劳和抗肿瘤等多种生物活性^[1-2], 被广泛应用于糖果、可食用薄膜等领域^[3]。然而, 薄荷醇极易挥发, 香气持久性不足, 同时具有一定刺激性, 制约了其使用效果^[4]。

二氧化硅具有优异的稳定性和生物相容性, 被广泛应用于食品加工中^[5-6]。同时, 较高的孔隙率和比表面积

赋予了其极佳的挥发性成分吸附能力^[7]。Qiu 等^[8]利用胺化介孔二氧化硅和松香钠的静电或化学作用制备了载体包封茶树油, 载荷可达 69%。此外, 二氧化硅通过吸附固化方式降低了挥发性物质分子间的碰撞概率, 隔绝了外界环境的不利影响, 提高了荷载挥发性成分的稳定性^[9]。Weisany 等^[10]使用介孔二氧化硅负载胡椒薄荷精油, 有效提高了精油的抑菌功效。但二氧化硅的开放式孔隙结构

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 32160563); 校企合作项目 (编号: 2023370000340521, 2024370000340145)

通信作者: 刘群 (1988—), 男, 山东中烟工业有限责任公司工程师, 学士。E-mail: 454994551@qq.com

收稿日期: 2024-05-11 **改回日期:** 2024-08-22

会导致所吸附挥发性成分的爆发性释放,影响载体的实际应用^[11]。使用有机组分作为孔阻断剂是提高二氧化硅吸附性能的有效手段^[12]。油凝胶是由凝胶剂网络捕获液体油滴形成的一种热可逆半固体脂质混合物,其通过物理屏障作用隔绝外部环境与包封成分,是活性成分包封与控释的良好载体^[13-14]。研究拟构建吸附薄荷醇油凝胶的二氧化硅附香颗粒,实现对开放型孔隙的封堵,提高附香颗粒的薄荷醇包封率、贮藏稳定性与缓释能力,旨在为具有长效留香和稳定释放特性的食品粉末香精开发提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

中链甘油三酯(MCT):含55.5%辛酸甘油三酯和44.5%癸酸甘油三酯,青岛海之源生命科技有限公司;

棕榈油(PO):熔点52℃,其中棕榈酸(C_{16:0})占60.3%,硬脂酸(C_{18:0})占4.8%,油酸(C_{18:1})占27.1%,亚油酸(C_{18:2})占6.3%,中粮东海粮油工业(张家港)有限公司;

二氧化硅:食品级,安吉东来药用辅料有限公司;

DL-薄荷醇(99%)、丙酸-2-苯乙酯(>98.0%):美国Sigma公司。

1.1.2 主要仪器设备

偏振光显微镜:DM2700P型,德国Leica公司;

质构分析仪:TA.XT plus型,英国SMS公司;

差示扫描量热仪(DSC):7000X型,株式会社日立制作所;

电子扫描显微镜(SEM):Zeiss Gemini 300型,德国卡尔—蔡司股份公司;

气相色谱质谱联用仪:Agilent/8890-5977B型,美国安捷伦科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 薄荷醇油凝胶的制备 精确称取PO与MCT,配制PO质量分数分别为30%,50%,80%的混合油相,80℃水浴至澄清,50℃水浴保温。精确称量2g薄荷醇晶体,加至18g混合油相中,密封条件下搅拌至薄荷醇完全溶解,取出冷却。根据混合油相中棕榈油质量分数,将样品分别命名为PO-30,PO-50和PO-80。

1.2.2 偏振光显微镜观察 取1滴熔融状态的油凝胶于载玻片上,用盖玻片按压成均匀薄片,室温下静置过夜,使用与数码相机连接的偏振光显微镜进行观察。

1.2.3 油凝胶硬度测定 根据陈小霞等^[15]的方法并修改。测前速度2mm/s,测中速度1mm/s,测后速度2mm/s,压缩深度15mm,触发力0.01N。

1.2.4 油凝胶保油率测定 根据Li等^[16]的方法,按式(1)

计算保油率。

$$C = \frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C——样品保油率,%;

m₀——空离心管质量,mg;

m₁——离心前装有样品的离心管总质量,mg;

m₂——排空析出油后装有样品的离心管总质量,mg。

1.2.5 油凝胶DSC测试 称取3~5mg油凝胶置于铝坩埚中,20℃平衡2min,以5℃/min升至90℃,记录熔融峰值温度T_m。

1.2.6 附香颗粒的制备 根据Garbera等^[17]的方法并修改。将熔融状态的油凝胶样品PO-50和PO-80分别趁热滴加至密封搅拌的等质量的二氧化硅颗粒中,混匀,得试验组附香颗粒PO-50-SiO₂和PO-80-SiO₂。对照组采用薄荷醇直接滴加制备,将薄荷醇于45℃水浴融化,添加量为5%。

1.2.7 附香颗粒的微观结构 采用SEM观察其微观形貌。

1.2.8 附香颗粒的休止角测定 根据赵晨晨等^[18]的方法,按式(2)计算休止角。

$$\tan \theta = \frac{2H}{D}, \quad (2)$$

式中:

θ——附香颗粒的休止角,°;

H——粉体圆锥的高度,mm;

D——粉体圆锥的直径,mm。

1.2.9 附香颗粒的薄荷醇包封率测定 根据蓝洪桥等^[19]的方法并修改。取1g附香颗粒,分散至40mL乙醇中,密封超声30min,4000r/min离心30min,经0.45μm有机相滤膜过滤后,采用气相色谱法测定薄荷醇含量。气相色谱条件:检测器采用FID;色谱柱为HP-5(30m×0.32mm×0.25μm);升温程序为160℃保持2min,以5℃/min升至200℃;进样口温度250℃;检测器温度250℃;进样量1μL,分流比50:1。按式(3)计算包封率。

$$E = \frac{W_1}{W_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

E——附香颗粒中薄荷醇包封率,%;

W₁——附香颗粒中薄荷醇质量分数,%;

W₂——添加薄荷醇质量分数,%。

1.2.10 附香颗粒的贮藏稳定性 将附香颗粒用自封袋包装,于25℃恒温箱中贮藏50d,测定贮藏终点时附香颗粒的薄荷醇包封率。

1.2.11 附香颗粒的释放特性 根据白家峰等^[20]的方法,按式(4)计算薄荷醇保留率。

$$R = \left(1 - \frac{W_1}{W_0}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

R ——薄荷醇保留率,%;

W_1 ——附香颗粒中薄荷醇质量分数,%;

W_2 ——添加薄荷醇质量分数,%。

1.2.12 数据处理 所有数据均以平均值±标准差表示,利用 Origin 2018 软件绘图,利用 SPSS 17.0 软件进行 Duncan 差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 油凝胶的表征

2.1.1 外观形态 研究^[21]显示,添加适量的液体油可以防止因固体脂质凝固结晶而压缩负载成分的容纳空间,避免其结晶泄漏。因此,选择棕榈油和 MCT 作为油相,通过调节油相中棕榈油(PO)的质量分数制备油凝胶样品。由图 1(a)可知,PO-30 中有大量的液体油析出,倒置时发生滑落,说明油凝胶结构未形成。Qiu 等^[22]研究表明,熔融状态的油凝胶在冷却凝胶过程中发生成核结晶,单个的结晶颗粒通过氢键、疏水相互作用、范德华力等相互作用形成结晶团簇,最后结晶团簇各向异性生长,形成了具有连续网络的稳定油凝胶系统。推测油凝胶未能成型的原因可能是体系中稀疏分散的棕榈油结晶团簇不足以通过各向异性生长形成链接的结晶网络。相比之下,PO-50 和 PO-80 倒置未滑落,说明油凝胶成功制备。由图 1(b)可知,暗场条件下,晶体网络的密集程度随棕榈油比例的增加而提高。此外,随着棕榈油比例的增加,油凝胶样品颜色由轻微透明转变为白色,与 Noonim 等^[23-24]的研究结果类似,说明油凝胶颜色与作为凝胶剂的固体油含量有关。

2.1.2 硬度与保油率 硬度是评价油凝胶网络紧密性的重要指标^[25]。由图 2 可知,PO-50 和 PO-80 的硬度与体系中添加棕榈油比例成正比,说明随着棕榈油含量的提高,体系中形成了能够抵抗更大压力的致密结晶网络^[26]。

保油率代表油凝胶三维网络对液体油滴的捕获能力和抗迁移能力,与贮藏期间薄荷醇从油凝胶中的释放损失相关^[27]。由图 2 可知,PO-30 的保油率仅为 21.38%,绝大多数液体油被离心出来,这与其外观相对应。相比之下,PO-50 和 PO-80 均具有较高的保油率,且 PO-80 的保油率达 98.63%,说明致密的油凝胶网络有效抑制了液体油滴的渗漏与迁移^[28]。

2.1.3 热力学性质 由图 3 可知,PO-30 中未观察到明显的熔融峰,表明样品的无定型特性,这与其油晶网络未能形成有关。结晶的油凝胶网络在常温下以固态形式存在,通过吸热转化为熔融状态,PO-50 和 PO-80 油凝胶样

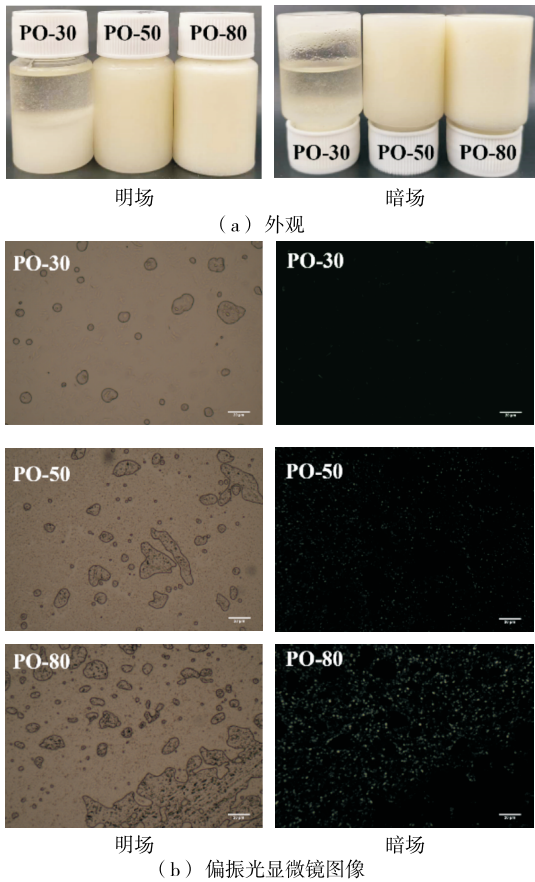
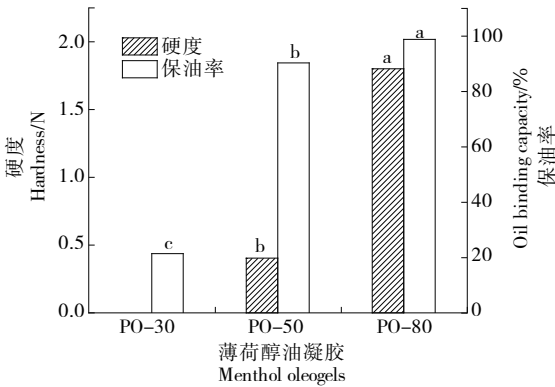


图 1 薄荷醇油凝胶的外观与偏振光显微镜图像
Figure 1 Appearance and polarized light microscopy images of menthol oleogels



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)
图 2 薄荷醇油凝胶的硬度与保油率
Figure 2 Hardness and oil binding capacity of menthol oleogels

品分别在 45.17、46.03 °C 观察到熔融峰值温度 T_m , 其随棕榈油质量分数的增大而提高, 与 Noonim 等^[23]的结果类似。

综上,当混合油相中棕榈油添加量为 50% 和 80% 时,

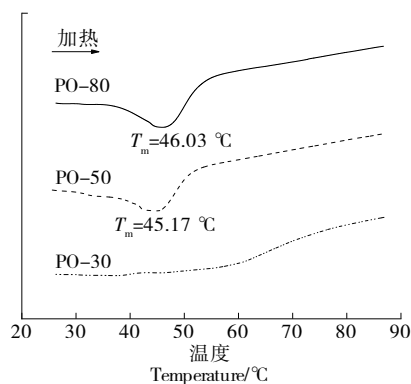


图3 薄荷醇油凝胶的DSC曲线
Figure 3 DSC curve of menthol oleogels

可成功构建油品网络支撑的油凝胶体系。因此,后续试验选择油凝胶 PO-50 和 PO-80 制备附香颗粒。

2.2 附香颗粒的形态与流动性

由图4可知,所制备的附香颗粒均具有近似的白色细颗粒外观,且均具有球形结构。对照组颗粒外表面相对平整,PO-50-SiO₂和PO-80-SiO₂颗粒能观察到油凝胶附着,其外表面具有更多的层状凸起,且在PO-80-SiO₂表面更为明显。对照组颗粒的表面局部形貌图像显示出粗糙的颗粒堆积与广泛分布的孔隙结构,试验组油凝胶网络在二氧化硅颗粒表面形成,有效实现了颗粒孔隙的掩蔽。PO-50-SiO₂和PO-80-SiO₂的休止角分别为29.26°,30.41°,均高于对照组,说明吸附油凝胶在一定程度上降低了附香颗粒的流动性能,这可能归因于油凝胶的附着导致附香颗粒表面更为粗糙,增大了颗粒间的摩擦阻力^[29]。

2.3 附香颗粒的薄荷醇包封率与贮藏稳定性

由图5可知,PO-50-SiO₂和PO-80-SiO₂的包封率分别为82.05%和91.19%,说明绝大部分薄荷醇被吸附包封至附香颗粒中。对照组的薄荷醇包封率仅为73.43%,可能是对照组的部分薄荷醇在加工过程中未被二氧化硅颗粒

吸附,从而挥发损失。

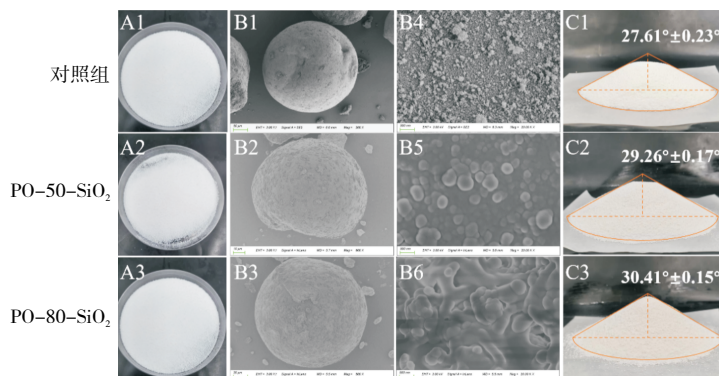
香精在载体材料中的稳定性对于香精的保存至关重要^[30]。贮藏终点时,对照组的薄荷醇包封率大幅降低,仅为30.77%,说明大部分薄荷醇在贮藏期间从二氧化硅颗粒的开放空隙中散失。PO-50-SiO₂和PO-80-SiO₂包封率仍维持在较高水平,分别为69.83%和80.28%,表明吸附油凝胶能有效提高附香颗粒的保香能力。Zhong等^[31]采用聚丙烯酸修饰的二氧化硅负载茶树油,将载体颗粒的抑菌有效期从未覆膜前的26 d大幅延长至50 d以上。究其原因,是通过聚丙烯酸链在孔隙表面的覆盖和聚合物引起的阻断效应,抑制了精油从载体颗粒的开放孔道逸散。

2.4 附香颗粒的薄荷醇释放特性

由图6可知,释放初期(0~50 min),所有附香颗粒均以较快的速度释放薄荷醇,推测是颗粒表面的薄荷醇在热空气吹扫下被快速释放。此后,释放曲线差异开始显现。对照组附香颗粒仍以较快速度释放薄荷醇,在吹扫时间为150 min时释放率约达91%,之后释放曲线趋于水平,说明其已达到释放终点。PO-50-SiO₂和PO-80-SiO₂具有相对更平稳的释放曲线,前者在200 min时达到最大释放值,后者在0~300 min的监测时段内保持稳定释放,说明油凝胶覆膜有效改善了附香颗粒的薄荷醇缓释性能,与Liao等^[32]的研究结果类似。油凝胶网络对附香颗粒孔道的封堵以及其熔融吸热对薄荷醇的保护为附香材料缓释性能改善的原因。

3 结论

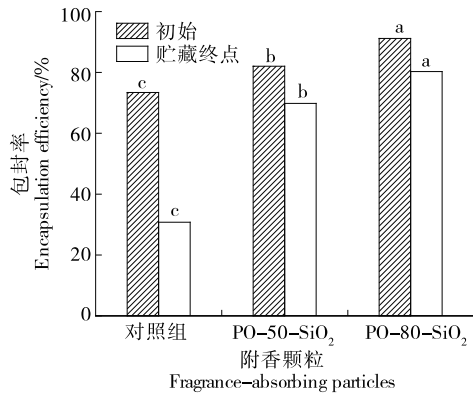
研究以不同比例的棕榈油与中链甘油三酯复合制备了薄荷醇油凝胶,并在此基础上构建了吸附油凝胶的二氧化硅附香颗粒。结果表明,混合油相中添加50%和80%的棕榈油成功实现了油凝胶的构建,该油凝胶具有较高的保油率,其硬度和熔融峰值温度随棕榈油添加量



从左至右依次为外观、颗粒整体形貌、颗粒表面局部形貌和休止角

图4 附香颗粒的外观、SEM及休止角

Figure 4 Appearance, SEM and angle of repose of fragrance-absorbing particles



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 附香颗粒在制备初始与贮藏终点的薄荷醇包封率
Figure 5 Menthol encapsulation efficiency of fragrance-absorbing particles at the initial and storage endpoints

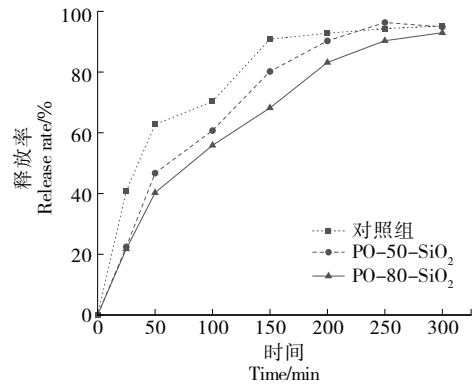


图6 附香颗粒的薄荷醇释放曲线

Figure 6 Menthol release profile of fragrance-absorbing particles

的增加而增大。微观图像和休止角测试证实了油凝胶在附香颗粒表面的附着和孔隙的封堵,致使附香颗粒具有更高的包封率和贮藏稳定性。释放特性研究表明,吸附油凝胶使薄荷醇释放曲线更加平滑。综上,吸附油凝胶能够有效提高附香颗粒的薄荷醇包封、贮藏与释放行为,实现对附香颗粒的薄荷醇附香性能改善。然而,研究尚未涉及附香颗粒在复杂食品体系应用中薄荷醇附香性能评价,后期将进一步测试附香颗粒在压片糖果等食品加工和贮藏过程薄荷醇的稳定性与释放特性,以评估附香颗粒的应用潜力。

参考文献

[1] KAMATOU G P P, VERMAAK I, VILJOEN A M, et al. Menthol: a simple monoterpene with remarkable biological properties[J]. *Phytochemistry*, 2013, 96: 15-25.
[2] 邵佩, 张雨迎, 钟琳, 等. 薄荷油的提取, 药理作用及微胶囊化

研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 235-240.
SHAO P, ZHANG Y Y, ZHONG L, et al. Research progress on extraction, pharmacological effects and microencapsulation of peppermint oil[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 235-240.
[3] HEDAYATI S, TARAHI M, AZIZI R, et al. Encapsulation of mint essential oil: techniques and applications[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2023, 321: 103023.
[4] HU Z M, SHAO M, ZHANG B, et al. Enhanced stability and controlled release of menthol using a β -cyclodextrin metal-organic framework[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131760.
[5] PRASEPTIANGGA D, MUFIDA N, PANATARANI C, et al. Enhanced multi functionality of semi-refined iota carrageenan as food packaging material by incorporating SiO₂ and ZnO nanoparticles[J]. *Heliyon*, 2021, 7(5): e06963.
[6] HUANG Y M, LI P, ZHAO R K, et al. Silica nanoparticles: biomedical applications and toxicity[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2022, 151: 113053.
[7] LU Z G, WANG J Z, QU L N, et al. Reactive mesoporous silica nanoparticles loaded with limonene for improving physical and mental health of mice at simulated microgravity condition[J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5(4): 1 127-1 137.
[8] QIU S F, GAO F, LIANG Z J, et al. Rosin modified aminated mesoporous silica adsorbed tea tree oil sustained-release system for improve synergistic antibacterial and long-term antibacterial effects[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(27): 275707.
[9] 任桂林, 柯刚, 郑琴, 等. 介孔二氧化硅 350FCP 固化陈皮、青皮挥发油研究[J]. *中草药*, 2021, 52(5): 1 323-1 334.
REN G L, KE G, ZHENG Q, et al. Study on volatile oil of citri reticulatae pericarpium and citri reticulatae pericarpium viride solidified by silica 350FCP[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(5): 1 323-1 334.
[10] WEISANY W, SAMADI S, TAHIR N A R, et al. Nano-encapsulated with mesoporous silica enhanced the antifungal activity of essential oil against *Botrytis cinerea* (Helotiales; Sclerotiniaceae) and *Colletotrichum nymphaeae* (Glomerellales; Glomerellaceae) [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2022, 122: 101902.
[11] JOBDEEDAMRONG A, JENJOB R, CRESPIY D. Encapsulation and release of essential oils in functional silica nanocontainers[J]. *Langmuir*, 2018, 34(44): 13 235-13 243.
[12] POYATOS-RACIONERO E, GUARÍ -BORRÀS G, RUIZ-RICO M, et al. Towards the enhancement of essential oil components' antimicrobial activity using new zein protein-gated mesoporous silica microdevices[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(7): 3 795.
[13] ZHAO W J, WEI Z H, XUE C H. Recent advances on food-grade oleogels: fabrication, application and research trends[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(27): 7 659-7 676.
[14] 刘龙龙, 王家镔, 陈治同, 等. 植物油脂凝胶的氧化稳定性及

- 货架期预测[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 105-110.
- LIU L L, WANG J B, CHEN Z T, et al. Study on oxidation stability and shelf life of oleogel[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 105-110.
- [15] 陈小霞, 陈莹, 王永华, 等. 橄榄油基二酰甘油油酸酯基油凝胶的物理性质及其在饼干中的应用[J]. 中国油脂, 2023, 48(12): 134-141.
- CHEN X X, CHEN Y, WANG Y H, et al. Physical properties of olive oil diacylglycerol oleate(O-DAGO) - based oleogel and its application in cookies[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(12): 134-141.
- [16] LI S J, CHEN J J, LIU Y T, et al. Preparation of citral oleogel and antimicrobial properties[J]. Gels, 2023, 9(12): 930.
- [17] GARBERA K, CIURA K, SAWICKI W. A novel approach to optimize hot melt impregnation in terms of amorphization efficiency[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(11): 4 032.
- [18] 赵晨晨, 吕家慧, 刘畅, 等. 不同粒径多花黄精粉物理特性及体外模拟胃肠消化特性研究[J/OL]. 食品工业科技. (2024-03-22) [2024-07-15]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120331>.
- ZHAO C C, LU J H, LIU C, et al. Physical properties and in vitro simulated gastrointestinal digestion characteristics of polygonatum cyrtoneura powder with different particle sizes[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2024-03-22) [2024-07-15]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120331>.
- [19] 蓝洪桥, 洪玮, 牡丹, 等. 气相色谱法测定薄荷醇微胶囊的包裹率[J]. 香料香精化妆品, 2011(1): 6-8, 16.
- LAN H Q, HONG W, HUA D, et al. Menthol encapsulation efficiency determined by gas chromatography[J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2011(1): 6-8, 16.
- [20] 白家峰, 王希庆, 陈义昌, 等. 聚多巴胺修饰的介孔二氧化硅微球的合成及其用于负载左旋薄荷醇凉味剂[J]. 无机材料学报, 2017, 32(8): 845-850.
- BAI J F, WANG X Q, CHEN Y C, et al. Synthesis of polydopamine modified mesoporous silica microspheres for encapsulation of *L*-menthol[J]. Journal of Inorganic Materials, 2017, 32(8): 845-850.
- [21] 刘典, 冯进, 李春阳. 基于Cur-NLCs的多重响应性微球的构建与评价[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 31-40.
- LIU D, FENG J, LI C Y. Construction and evaluation of multiple responsive microspheres based on Cur-NLCs[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 31-40.
- [22] QIU H T, ZHANG H, EUN J B. Oleogel classification, physicochemical characterization methods, and typical cases of application in food: a review[J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(6): 1 273-1 293.
- [23] NOONIM P, RAJASEKARAN B, VENKATACHALAM K. Structural characterization and peroxidation stability of palm oil-based oleogel made with different concentrations of carnauba wax and processed with ultrasonication[J]. Gels, 2022, 8(12): 763.
- [24] 刘书成, 马健康, 王蔚雯, 等. 蜂蜡添加量对鱼油凝胶宏观性质及微观结构的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(4): 90-98.
- LIU S C, MA J K, WANG W W, et al. Effect of beeswax addition on the macroscopic properties and microstructure of sardine fish oleogel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(4): 90-98.
- [25] ZBIKOWSKA A, ONACIK-GÜR S, KOWALSKA M, et al. Analysis of stability, rheological and structural properties of oleogels obtained from peanut oil structured with yellow beeswax[J]. Gels, 2022, 8(7): 448.
- [26] ZHANG Y Z, XU J Q, TANG C, et al. Crystallization behavior and physical properties of monoglycerides-based oleogels as function of oleogelator concentration[J]. Foods, 2023, 12(2): 345.
- [27] ROPCIUC S, DRANCA F, OROIAN M A, et al. Structuring of cold pressed oils: evaluation of the physicochemical characteristics and microstructure of white beeswax oleogels[J]. Gels, 2023, 9(3): 216.
- [28] LI L, TAHA A, GENG M J, et al. Ultrasound-assisted gelation of β -carotene enriched oleogels based on candelilla wax-nut oils: physical properties and in-vitro digestion analysis[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 79: 105762.
- [29] SHAMS R, SINGH J, DASH K K, et al. Effect of maltodextrin and soy protein isolate on the physicochemical and flow properties of button mushroom powder[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 908570.
- [30] CUI X J, YE D H, WEI J K, et al. Controlled thermal release of *L*-menthol with cellulose-acetate-fiber-shelled metal-organic framework[J]. Molecules, 2022, 27(18): 6 013.
- [31] ZHONG X M, GAO F, WEI H J, et al. Functionalization of mesoporous silica as an effective composite carrier for essential oils with improved sustained release behavior and long-term antibacterial performance[J]. Nanotechnology, 2022, 33(3): 035706.
- [32] LIAO Y T, LEE C H, CHEN S T, et al. Gelatin-functionalized mesoporous silica nanoparticles with sustained release properties for intracameral pharmacotherapy of glaucoma[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2017, 5(34): 7 008-7 013.