

# 静磁场辅助 $\beta$ -环糊精包埋广藿香精油

张华丽<sup>1</sup>, 周宇益<sup>2</sup>, 李荣明<sup>2</sup>, 杨哪<sup>3\*</sup>

(1. 济宁医学院, 山东省出生缺陷研究与转化协同创新中心, 山东济宁 272067) (2. 英都斯特(无锡)感应科技有限公司, 江苏无锡 214035) (3. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 为探究静磁场对挥发性药物包埋性能的影响, 以 $\beta$ -环糊精为包埋壁材, 广藿香精油为芯材, 在0、3、6和10 mT静磁场环境下, 测定 $\beta$ -环糊精与广藿香精油在不同包含参数下包埋率的变化规律。结果表明, 随壁材质量分数、芯材质量分数、壁芯比、温度、处理时间和转速的增加, 广藿香精油的包埋率先增加后下降。相同包含条件下, 与对照相比, 随静磁场强度增加, 广藿香精油包埋率显著增大 ( $P<0.05$ )。与对照相比, 3、6和10 mT静磁场下, 质量分数为30%的 $\beta$ -环糊精壁材和质量分数为80%的广藿香精油芯材, 壁芯比3:1, 温度45℃, 200 r/min下处理2 h, 广藿香精油包埋率分别增大4.46%、8.80%和13.01%, 磁场环境有效提升了广藿香精油包合物的包埋性能, 为促进挥发性药物的包埋提供了一种新的参考方法。

**关键词:** 静磁场;  $\beta$ -环糊精; 广藿香精油; 包埋率; 包合物

文章编号: 1673-9078(2023)03-216-221

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.3.0475

## $\beta$ -Cyclodextrin Encapsulated *Pogostemon cablin* Oil with the Assistance of Static Magnetic Field

ZHANG Huali<sup>1</sup>, ZHOU Yuyi<sup>2</sup>, LI Rongming<sup>2</sup>, YANG Na<sup>3\*</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Birth Defect Research and Transformation of Shandong Province, Jining Medical University, Jining 272067, China) (2. INDUC Scientific Co. Ltd., Wuxi 214035, China) (3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of static magnetic field on the embedding performance of volatile drugs, the  $\beta$ -cyclodextrin and the *Pogostemoncablin* oil were used as embedded wall material and core material. The embedding rate of  $\beta$ -cyclodextrin and *Pogostemoncablin* oil under different binding parameters were analyzed at 0, 3, 6 and 10 mT static magnetic field. The results showed that the embedding rate of *Pogostemoncablin* oil increased firstly and then decreased with the increase of wall material mass fraction, core material mass fraction, wall core ratio, temperature, treatment time and rotational speed. Under the same inclusion conditions, compared with the control, the embedding rate of *Pogostemoncablin* oil increased significantly with the increase of static magnetic field intensity ( $P<0.05$ ). Compared with the control, under 3, 6 and 10 mT static magnetic field, the embedding rate of *Pogostemoncablin* oil increased by 4.46%, 8.80% and 13.01% respectively when wall material of  $\beta$ -cyclodextrin with a mass fraction of 30% and the core material of *Pogostemoncablin* oil with a mass fraction of 80% were treated at 45℃ and 200 r/min for 2 h with a wall core ratio of 3:1. Static magnetic field enhanced the entrapment performance of the *Pogostemoncablin* oil inclusion compound, and this study provides a new reference method for promoting the embedding of volatile drugs.

**Key words:** static magnetic field;  $\beta$ -cyclodextrin; *Pogostemon cablin* oil; embedding rate; inclusion complex

引文格式:

张华丽,周宇益,李荣明,等.静磁场辅助 $\beta$ -环糊精包埋广藿香精油[J].现代食品科技,2023,39(3):216-221.

ZHANG Huali, ZHOU Yuyi, LI Rongming, et al.  $\beta$ -Cyclodextrin encapsulated *Pogostemon cablin* oil with the assistance of static magnetic field [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 216-221.

收稿日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172353); 江苏省优秀青年基金项目(BK20211582); 山东省中医药科技发展计划项目(2019-0444)

作者简介: 张华丽(1976-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 药物分析学, E-mail: hualizhang@163.com

通讯作者: 杨哪(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品非热加工技术, E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn

广藿香 (*Pogostemon cablin* (Blanco) Benth.) 是一种唇形科刺蕊草属植物, 广泛分布于我国广东、广西、海南和云南等地区<sup>[1]</sup>。广藿香作为一种常用中药材, 临床可用于治疗呕吐、腹泻和脘腹胀痛等, 其精油可有效缓解肠道及皮肤疾病, 强化中枢神经系统, 安抚情绪。但是, 广藿香精油易挥发、味道强烈, 贮藏及运输困难, 导致其应用受限<sup>[2]</sup>。

$\beta$ -环糊精 ( $\beta$ -cyclodextrin,  $\beta$ -CD) 是由 7 个 D-吡喃型葡萄糖残基通过  $\alpha$ -1,4 糖苷键连接, 具有一个亲水外环、和一个疏水且有一定尺寸的立体手性疏水内腔, 该特殊结构使其可包络维生素、三硝酸甘油、酶和难溶性药物等不同物质<sup>[3]</sup>。 $\beta$ -CD 价格低廉、制作简单, 广泛应用于食品、香精、化妆品及医药领域,  $\beta$ -CD 形成的包合物具有稳定性强、无毒副作用、脂溶性药物溶解性高等特点, 且因其口服毒性极低, 已被美国、日本等国家药典记载为口服辅药<sup>[4]</sup>。徐晶等<sup>[5]</sup>采用  $\beta$ -CD 包埋柠檬醛, 柠檬醛包埋率为 78.8%; 何慧等<sup>[6]</sup>利用  $\beta$ -CD/O-羧甲基壳聚糖纳米粒包埋疏水性光敏药物硝苯地平, 包封率和载药量达 82.38% 和 18.41%, 4 h 降解率达 42.43%, 有效提高硝苯地平稳定性; 尹海梦等<sup>[7]</sup>采用  $\beta$ -CD 包埋吡啶美辛, 包封率为 57.47%, 2 h 累积释药量达 60%, 有效提高结肠释药靶向性; 李国良等<sup>[8]</sup>采用  $\beta$ -CD 包埋肉桂叶精油, 其包埋率达 74.17%。 $\beta$ -CD 及其衍生物的包埋方法主要为研磨法、超声法和气-液包封法等, 吴传红等<sup>[9]</sup>采用研磨法制备薄荷油-磺丁基醚- $\beta$ -CD 包合物, 包埋率为 45%; 汪瑞敏等<sup>[10]</sup>采用 250 W 超声波辅助羟丙基- $\beta$ -CD 包合苏麻油中  $\alpha$ -亚麻酸, 包埋率为 87.11%; Jiang 等<sup>[11]</sup>利用 120 W 超声制备茶树油-羟丙基- $\beta$ -CD 包合物, 包埋率 80.63%, 且稳定性及抑菌性能显著提升。磁场作为一种重要的物理场, 可有效调控金属及高分子材料的组织结构及性能, 诱导物质发生感应取向, 特别是针对抗磁性物质, 例如水分子、氨基酸、酶类和有机化合物等, Liu 等<sup>[12]</sup>研究发现, 在钕磁铁产生的 150 mT 静磁场环境下, 壳聚糖包埋固定化  $\alpha$ -淀粉酶, 其活性提高 20%。磁场环境辅助  $\beta$ -环糊精等壁材包埋挥发性药物的研究鲜有报道, 然而, 采用钕磁铁等永磁体产生的静磁场, 磁力线不具有均匀性, 在不同距离方向衰减性较强, 因此本文采用磁场均匀的 0~10 mT 电磁场, 为 0.05 mT 地表磁场的 200 倍。

本文以  $\beta$ -CD 为包埋壁材, 广藿香精油为包埋芯材, 研究不同静磁场环境下, 包合物壁材质量分数、芯材质量分数、壁芯比、温度、处理时间和转速对广藿香精油包埋率的影响,

探究静磁场环境辅助  $\beta$ -环糊精包埋广藿香精油的

可行性, 为挥发性药物的包埋提供一种新的技术方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

广藿香精油 (纯度 99%), 购于江西鑫森天然植物油有限公司;  $\beta$ -CD (纯度 99%) 和无水乙醇 (纯度  $\geq 99.5\%$ ) 为分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 主要仪器设备

MFI-A1 磁场振荡培养箱 (静磁场强度 0~10 mT), 英都斯特 (无锡) 感应科技有限公司; HWS-24 电热恒温水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; AL204 电子天平, 瑞士 METTLER TOLEDO 仪器有限公司; SHB-III 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; G-03 冻干机, 厦门联友冷冻设备有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 广藿香精油包合物的制备

取一定量的  $\beta$ -CD, 加入去离子水, 制备质量分数为 10%、20%、30%、40% 和 50% 的壁材; 取一定量的广藿香精油, 加入无水乙醇, 制备质量分数为 20%、40%、60%、80% 和 100% 的芯材; 按照  $\beta$ -CD 与广藿香精油的壁芯比为 1:1、2:1、3:1、4:1 和 5:1, 向  $\beta$ -CD 溶液中缓慢加入广藿香精油, 静磁场强度为 0 (对照组)、3、6 和 10 mT, 于温度 35、45、55 和 65 °C 下振荡处理 1.0、1.5、2.0 和 2.5 h, 转速为 100、150、200 和 250 r/min。混合液置于 4 °C 冷藏过夜后抽滤, 用去离子水洗涤 3 次, 冷冻干燥 48 h, 得到粉末状广藿香精油包合物。

#### 1.3.2 广藿香精油包合物包埋率分析

准确称取 1.0 g 广藿香精油, 加入无水乙醇定容至 100 mL, 配成质量浓度为 10 g/L 的广藿香精油-无水乙醇标准溶液, 以无水乙醇为空白, 在广藿香精油最大吸收波长 288 nm 处测定吸光度, 绘制 0.05~1.0 g/L 的广藿香精油标准曲线。取 2 份 0.5 g 广藿香精油包合物样品, 加入 20 mL 无水乙醇, 室温下, 900 W 分别超声 10 和 40 min, 于 5 000 r/min 离心 10 min, 分别取上清液, 在 288 nm 波长下测定其吸光度值, 得到上清液中精油质量  $m_1$  和  $m_2$ , 广藿香精油包埋率计算公式如下<sup>[13,14]</sup>。

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

式中:

A——广藿香精油包埋率, %;

$m_1$ ——包合物表面精油质量, g;

$m_2$ ——包合物精油质量, g;

$m_0$ ——投入精油量, g。

## 1.4 数据分析

采用 Origin 8.5 进行制图, SPSS 25.0 软件进行数据分析, 每个样品重复测定 3 次, 以平均值和方差分析 (ANOVA) 表示显著性差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 静磁场环境下 $\beta$ -CD 壁材质量分数对广藿香精油包埋率的影响

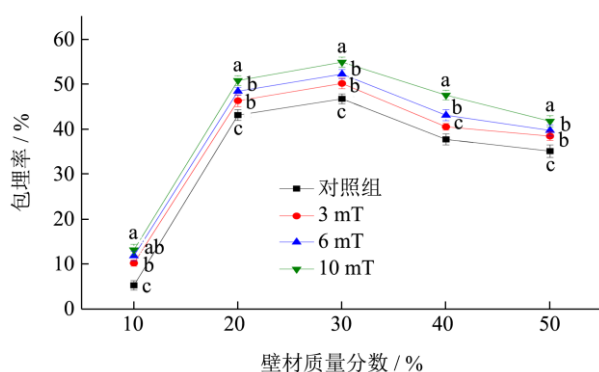


图1 静磁场环境下  $\beta$ -CD 壁材质量分数对包埋率的影响

Fig.1 Effect of content of  $\beta$ -CD wall material on embedding rate under static magnetic field

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ ),

图 2~6 同。

将  $\beta$ -CD 与去离子水制备成质量分数为 10%、20%、30%、40%和 50%的壁材, 加入质量分数为 100%的广藿香精油, 壁芯比为 5:1, 温度 55 °C, 转速 200 r/min, 0、3、6 和 10 mT 的静磁场环境下处理 2 h。从图 1 中可以发现, 当  $\beta$ -CD 壁材质量分数从 10% 增加至 30%, 广藿香精油包埋率急剧上升, 后随壁材质量分数增加略有下降。这与傅新政等<sup>[15]</sup>研究结果相似, 随多孔淀粉壁材质量分数的增加, 粉末黄油的包埋率呈现先升高后降低的趋势。磁场环境下, 随磁场强度增加, 广藿香精油包埋率显著增大 ( $P < 0.05$ )。与对照相比, 当  $\beta$ -CD 壁材质量分数为 30%时, 3、6 和 10 mT 磁场环境下, 广藿香精油包埋率分别提高 7.34%、11.75%和 17.46%。Yin 等<sup>[16]</sup>研究发现, 具有高度对齐的多层结构的复合材料, 在磁场环境下定向对齐, 其性能提高 2~4 倍。郭振良等<sup>[17]</sup>发现, 在磁场环境下,  $\beta$ -CD 亚甲基和吡喃糖苷键的孤对电子在磁场方向受到磁力矩的作用, 产生有序伸缩振动, 可容纳

更多芯材。 $\beta$ -CD 壁材的立体手性疏水内腔可包络广藿香精油, 在磁场环境下,  $\beta$ -CD 壁材有序性增加, 包埋率增大, 但随壁材质量分数的增加,  $\beta$ -CD 剩余大量空腔, 包埋率逐渐下降, 后续选择  $\beta$ -CD 壁材质量分数为 30%。

### 2.2 静磁场环境下芯材质量分数对广藿香精油包埋率的影响

将广藿香精油与无水乙醇制备成质量分数为 20%、40%、60%、80%和 100%的芯材, 加入质量分数为 30%的  $\beta$ -CD 壁材, 壁芯比为 5:1, 温度 55 °C, 转速 200 r/min, 0、3、6 和 10 mT 的静磁场环境下处理 2 h。从图 2 中可以发现, 广藿香精油包合物包埋率随芯材质量分数与磁场强度的增加而增大, 当广藿香精油质量分数超过 80%时, 包埋率略有下降, 磁场环境下包埋率较对照组显著提高 ( $P < 0.05$ )。殷诚等<sup>[18]</sup>采用  $\beta$ -环糊精包合牛至精油, 随包埋壁材质量的增加, 包埋率先上升后下降。与对照相比, 3、6 和 10 mT 磁场环境处理, 当芯材质量分数为 80%时, 广藿香精油包埋率分别增加 5.32%、9.16%和 14.31%。当芯材质量分数增加时, 壁材无法完全包埋芯材, 表面油含量增加, 包埋率下降。后续选择广藿香精油质量分数为 80%。

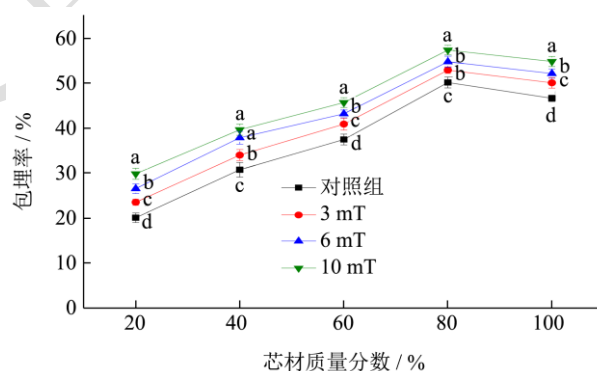


图2 静磁场环境下广藿香精油芯材质量分数对包埋率的影响

Fig.2 Effect of content of core material of Pogostemon cablin oil on embedding rate under static magnetic field

### 2.3 静磁场环境下壁芯比对广藿香精油包埋率的影响

将质量分数为 30%的  $\beta$ -CD 壁材和质量分数为 80%的广藿香精油芯材, 按照壁芯比为 1:1、2:1、3:1、4:1 和 5:1, 温度 55 °C, 转速 200 r/min, 0、3、6 和 10 mT 的静磁场环境下处理 2 h。从图 3 中可以发现, 广藿香精油包埋率随壁芯比变化呈现先增加后下降的趋势。与王风雷等<sup>[19]</sup>研究结果相似, 莱菔素-羟丙基

$\beta$ -CD 包合物的包埋率随壁芯比的先增大后减少。静磁场环境下, 随磁场强度的增加, 广藿香精油包埋率显著增大 ( $P < 0.05$ ), 当物料比为 3:1 时, 广藿香精油包埋率最大, 3、6 和 10 mT 静磁场环境下广藿香精油包埋率较对照组分别提高 4.30%、7.66% 和 12.58%。与郭振良等<sup>[17]</sup>研究结果相似, 在 0.8 T 磁场环境下,  $\beta$ -CD 腔内结构有序性提高, 增强  $\beta$ -CD 与 4-氨基安替比林包合物的自组装。当  $\beta$ -CD 与广藿香精油壁芯比较低时,  $\beta$ -CD 无法充分包埋广藿香精油, 而当壁芯比过高时,  $\beta$ -CD 剩余大量空腔, 包埋率下降。磁场环境下,  $\beta$ -CD 空腔结构排列更有序, 广藿香精油包埋性能显著提高, 后续选择 3:1 为  $\beta$ -CD 与广藿香精油的壁芯比。

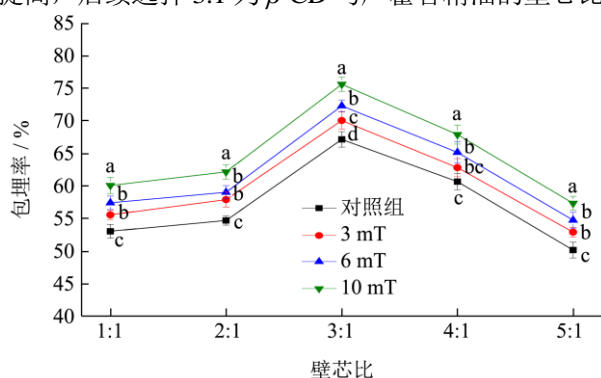


图3 静磁场环境下  $\beta$ -CD 与广藿香精油壁芯比对包埋率的影响

Fig.3 Effect of ratio of  $\beta$ -CD and *Pogostemon cablin* oil on embedding rate under static magnetic field

#### 2.4 静磁场环境下温度对广藿香精油包埋率的影响

将质量分数为 30% 的  $\beta$ -CD 壁材和质量分数为 80% 的广藿香精油芯材, 按照壁芯比为 3:1, 于 35 °C、45 °C、55 °C 和 65 °C 下, 转速 200 r/min, 0、3、6 和 10 mT 的静磁场环境下处理 2 h。从图 4 中可以发现, 广藿香精油包埋率随处理温度的升高发生改变, 处理温度为 45 °C 时, 广藿香精油包埋率最高。方浩标等<sup>[20]</sup>发现紫苏精油  $\beta$ -CD 包合物的包封率随包合温度的增加, 先上升后下降, 53 °C 下包封率最佳。相同温度下, 随磁场强度增加, 广藿香精油包埋率增大。10 mT 静磁场环境下, 与对照相比, 35 °C、45 °C、55 °C 和 65 °C 下广藿香精油包封率分别提高 6.82%、13.01%、12.58% 和 10.84%。Bielas 等<sup>[21]</sup>认为磁场环境下, 乳液由于 Neel-Brown 弛豫引起的磁能耗散以及磁滞损耗, 产生局部升温。与对照相比, 磁场环境下, 广藿香精油局部升温, 有效促进芯材进入壁材, 包埋率增加 ( $P < 0.05$ )。随反应温度升高, 体系中分子布朗运动加剧, 扩散能力增强, 广藿香精油进入  $\beta$ -CD 空腔数

量增加, 当温度持续升高, 广藿香精油挥发加剧, 包埋率下降。肖翔等<sup>[22]</sup>发现外加磁场作用下, 羟丙基- $\beta$ -CD 水溶液中芘分子取向发生改变, 激发芘分子从单重态到三重态的变化, 疏水作用增大, 荧光强度增加。静磁场环境下, 广藿香精油包合物中,  $\beta$ -CD 及广藿香精油分子取向增强, 分子间疏水相互作用增大, 广藿香精油疏水性部分进入  $\beta$ -CD 空腔, 广藿香精油包埋率增大, 后续选择 45 °C 为  $\beta$ -CD 与广藿香精油的处理温度。

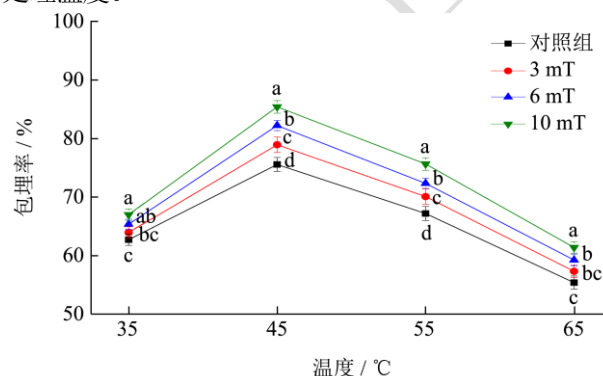


图4 静磁场环境下温度对包埋率的影响

Fig.4 Effect of temperature on embedding rate under static magnetic field

#### 2.5 静磁场环境下处理时间对广藿香精油包埋率的影响

将质量分数为 30% 的  $\beta$ -CD 壁材和质量分数为 80% 的广藿香精油芯材, 按照壁芯比为 3:1, 温度 45 °C, 转速 200 r/min, 0、3、6 和 10 mT 的静磁场环境下处理不同时间。从图 5 中可以发现, 广藿香精油包埋率随处理时间的增加, 呈现先上升后下降的趋势。随磁场强度增加, 广藿香精油包埋性能显著增强。与对照相比, 10 mT 磁场环境下处理 1、1.5、2 和 2.5 h, 广藿香精油包埋率分别提高 4.35%、11.17%、13.01% 和 7.04%, 磁场环境下处理 1 h 时, 磁场强度变化对包埋率无显著影响 ( $P > 0.05$ )。威海娜等<sup>[23]</sup>发现, 以  $\beta$ -CD 为壁材包埋薄荷精油时, 扩散到  $\beta$ -CD 中的薄荷精油处于包埋和解析的动态平衡中, 随处理时间延长, 解析量增加, 包埋率下降。Amin 等<sup>[24]</sup>发现磁场环境下纤维素纳米晶颗粒有序性增加, 淀粉基纤维素纳米晶复合膜截面积均匀且无空隙, 晶须定向排列, 三维取向自由度下降, 晶格形成概率增加, 改善薄膜性能。静磁场环境下,  $\beta$ -CD 与广藿香精油分子有序性提高, 广藿香精油进入  $\beta$ -CD 空腔, 包埋率增加, 后续选择 2 h 为  $\beta$ -CD 与广藿香精油的处理时间。



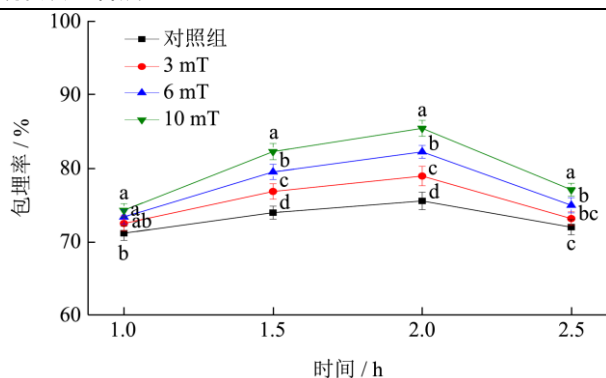


图5 静磁场环境下处理时间对包埋率的影响

Fig.5 Effect of time on embedding rate under static magnetic field

## 2.6 静磁场环境下转速对广藿香精油包埋率的影响

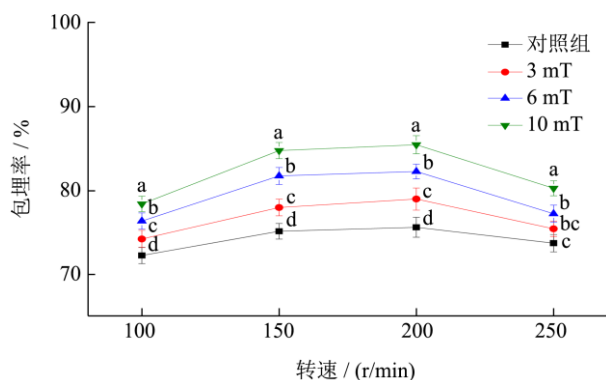


图6 静磁场环境下转速对包埋率的影响

Fig.6 Effect of speed on embedding rate under static magnetic field

将质量分数为 30% 的  $\beta$ -CD 壁材和质量分数为 80% 的广藿香精油芯材, 按照壁芯比为 3:1, 温度 45 °C, 不同包合转速下, 0、3、6 和 10 mT 的静磁场环境下处理 2 h。从图 6 中可以发现, 与对照相比, 磁场环境下广藿香精油包合物的包埋率随包合转速的增加包埋率显著提高 ( $P < 0.05$ ), 10 mT 磁场环境下, 150 r/min 和 200 r/min 下广藿香精油包埋率分别提高 12.79% 和 13.01%, 包埋率最大达到 85.45%。随磁场的增加, 广藿香精油包埋率增加, 3 和 6 mT 磁场环境下, 200 r/min 处理 2 h, 广藿香精油包埋率较对照组提高 4.46% 和 8.80%。随包合转速的增加, 广藿香精油与  $\beta$ -CD 碰撞加剧, 进入空腔机率增大, 但包合转速持续增加时, 广藿香精油与  $\beta$ -CD 的疏水作用遭到破坏, 广藿香精油挥发, 广藿香精油的包埋率下降。与许波<sup>[25]</sup>研究相似, 电磁场作用加强了甲醛分子在纤维素中的扩散运动, 在不破坏纤维素稳定性的前提下, 增强纤维素取向, 提高甲醛分子与纤维素的相互作用。

Zhang 等<sup>[26]</sup>发现, 当含  $\beta$ -CD 的透明质酸暴露在磁场环境下, 透明质酸沿磁场方向发生取向, 且取向速度与磁场强度呈线性相关。磁场环境下, 适当的包合转速有利于增强分子取向, 促进广藿香精油包埋, 当转速过高, 干扰分子取向, 广藿香精油包埋性能下降。

## 3 结论

本研究以  $\beta$ -CD 为包埋壁材, 广藿香精油为芯材, 在不同静磁场环境下进行包合处理, 并对广藿香精油包合物的包埋性能进行分析。研究发现静磁场环境下, 随壁材质量分数、芯材质量分数、壁芯比、温度、处理时间和转速的增加, 广藿香精油包合物包埋率呈现先增加后下降的趋势。不同处理条件下, 与对照相比, 随静磁场强度增加, 广藿香精油的包埋率显著增大 ( $P < 0.05$ )。10 mT 静磁场下, 质量分数为 30% 的  $\beta$ -CD 壁材和质量分数为 80% 的广藿香精油芯材, 壁芯比 3:1, 温度 45 °C, 200 r/min, 45 °C 下处理 2 h, 广藿香精油包埋率为 85.45%, 较对照组增大 13.01%, 包埋性能增强。静磁场辅助  $\beta$ -环糊精包埋广藿香精油, 为挥发性药物的包埋提供了一种新的手段, 但磁场环境对挥发性药物包埋过程中的壁材及芯材分子微观结构影响以及采用更高强度的磁场辅助包埋仍有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] Dantas T N, Cabral T J, Neto A A, et al. Enrichment of patchouli extracted from patchouli (*Pogostemon cablin*) oil by molecular distillation using response surface and artificial neural network models [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2020, 81: 219-227.
- [2] Lee J Y, Lee S H. Essential oil compound, patchouli alcohol, represses tumor formation *in vivo* and causes G1 arrest by downregulating  $\beta$ -catenin transcriptional activity in colon cancer cells (FS13-02-19) [J]. Current Developments in Nutrition, 2019, 3: nzz030.
- [3] Chen Z J, Zong L, Chen C W, et al. Development and characterization of PVA-starch active films incorporated with  $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex embedding lemongrass (*Cymbopogon citratus*) oil [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100565.
- [4] 郑佳成, 李瑞雪, 史博, 等. 功能化  $\beta$ -环糊精的制备及其应用研究进展[J]. 化工时刊, 2021, 35(6): 21-24.
- [5] 徐晶, 刘欢, 夏光辉, 等.  $\beta$ -环糊精包埋柠檬醛微胶囊工艺优化及其缓释性能[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 82-86.
- [6] 何慧, 季金苟, 刘月华, 等.  $\beta$ -环糊精/O-羧甲基壳聚糖纳米粒

- 对光敏性药物的联合保护[J].高分子材料科学与工程,2016,32(1):105-109.
- [7] 尹海梦,王丹,林辉焕,等.吡啶美辛/ $\beta$ -环糊精/壳聚糖纳米粒制备及体外释放[J].生物化工,2020,6(3):16-20.
- [8] 李国良,刘香萍.肉桂叶精油/ $\beta$ -环糊精微胶囊的制备及缓释特性[J].林产化学与工业,2021,41(4):35-41.
- [9] 吴传红,仲瑞雪,魏庭森,等.薄荷油-磺丁基醚- $\beta$ -环糊精的包合物的制备及表征[J].中国食品添加剂,2020,31(9):14-18.
- [10] 汪瑞敏,朱秋劲.超声波辅助羟丙基- $\beta$ -环糊精包合法提取苏麻油中ALA的研究[J].农产品加工(上半月),2017,8:12-15.
- [11] Jiang S, Zhao T T, Wei Y Y, et al. Preparation and characterization of tea tree oil/ hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex and its application to control brown rot in peach fruit [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107037.
- [12] Liu Y, Jia S Y, Ran J Y, et al. Effects of static magnetic field on activity and stability of immobilized  $\alpha$ -amylase in chitosan bead [J]. Catalysis Communications, 2010, 11(5): 364-367.
- [13] 王艳丽,袁超,刘亚伟.肉桂精油/羟丙基- $\beta$ -环糊精包合物的表征及成分分析[J].中国食品添加剂,2018,11:56-61.
- [14] 付丽娜,赵宁,何树苗,等.茉莉精油羟丙基- $\beta$ -环糊精包合物的制备与性能研究[J].中国药师,2018,21(11):1906-1912.
- [15] 傅新征,叶珊珊,吴玉琼,等.红薯多孔淀粉应用于喷雾干燥法制备粉末黄油的研究[J].粮食与油脂,2022,35(2):74-78.
- [16] Yin K Y, Reese B A, Sullivan C R, et al. Superior mechanical and magnetic performance of highly anisotropic sendust-flake composites freeze cast in a uniform magnetic field [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31: 2007743.
- [17] 郭振良,乔青安,王峰.恒稳磁场对  $\beta$ -环糊精包结 4-氨基安替比林自组装行为的影响研究[J].分析测试学报,2017,36(12):1452-1457.
- [18] 殷诚,黄崇杏,张波波,等.牛至精油- $\beta$ -环糊精微胶囊制备工艺研究[J].粮食与油脂,2021,34(2):51-54.
- [19] 王风雷,赵功玲,郭丹丹,等.莱菔素-羟丙基- $\beta$ -环糊精包合物的制备工艺与表征[J].中国食品添加剂,2020,31(2):132-137.
- [20] 方浩标,李春海,张钟,等.响应面法优化饱和水溶液法制备紫苏精油  $\beta$ -环糊精包合物工艺及其理化性质[J].绿色包装,2019,1:46-54.
- [21] Bielas R, Hornowski T, Pauloviov á K, et al. The effect of magnetic particles covering the droplets on the heating rate of pickering emulsions in the AC magnetic field [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 320: 114388.
- [22] 肖翔,任锋,朱亚先,等.磁场效应对羟丙基- $\beta$ -环糊精/芘体系 I<sub>1</sub>/I<sub>3</sub> 值的影响[J].厦门大学学报(自然科学版),2007,4:534-537.
- [23] 威海娜,李龙,李慧.薄荷精油微胶囊的制备及其在鞋垫中的应用[J].西安工程大学学报,2017,31(6):735-741.
- [24] Amin B B, Benjamin C, Matthew J D, et al. Effect of magnetic field alignment of cellulose nanocrystals in starch nanocomposites: physicochemical and mechanical properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116688.
- [25] 许波,陈振乾.高压静电场对纤维素 I $\beta$  中甲醛扩散的影响[J].化工学报,2016,67(S1):57-62.
- [26] Zhang B, Yu Q L, Liu Y. Polarization of stem cells directed by magnetic field-manipulated supramolecular polymeric nanofibers [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(8): 9580-9588.