

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250306002

引用格式: 张岩, 徐莉, 邱书恒, 等.  $\beta$ -环糊精纳米海绵的制备及丹皮酚负载效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 215–221.

ZHANG Y, XU L, QIU SH, *et al.* Research on preparation of  $\beta$ -cyclodextrin nanosponge and paeonol loading effects [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 215–221. (in Chinese with English abstract).

# $\beta$ -环糊精纳米海绵的制备及丹皮酚负载效果研究

张岩<sup>1\*</sup>, 徐莉<sup>2</sup>, 邱书恒<sup>1</sup>, 韩雪婷<sup>1</sup>, 朱硕麒<sup>1</sup>, 方蒿锐<sup>1</sup>, 王保营<sup>2</sup>, 王建闯<sup>1</sup>

(1. 河南牧业经济学院包装与印刷工程学院, 郑州 450046;

2. 河南省农产品保鲜智能包装工程技术研究中心, 郑州 450046)

**摘要:** **目的** 制备一种  $\beta$ -环糊精纳米海绵, 并探究丹皮酚负载效果。**方法** 通过交联法制备环糊精纳米海绵, 采用红外光谱法检测、X 射线衍射和热重分析, 判断交联效果, 通过扫描电子显微镜分析纳米海绵形貌和孔隙状态。采用浸泡法将丹皮酚负载于纳米海绵中, 使用液相色谱法检测分析负载效果。**结果** 从红外光谱法分析可知交联反应获得了 6 种纳米海绵, 原  $\beta$ -环糊精晶体结构因为生成新的产物而消失。纳米海绵热稳定性相比  $\beta$ -环糊精有所下降, 获得 3 种孔隙形貌相对完整和均匀的纳米海绵, 其对丹皮酚的负载率分别为 19.31%、12.27%、5.78%。**结论** 合成的多孔纳米海绵负载丹皮酚效果较好, 可以应用在食品或生鲜产品的活性包装中。

**关键词:** 纳米海绵;  $\beta$ -环糊精; 活性物质; 负载; 多孔材料

## Research on preparation of $\beta$ -cyclodextrin nanosponge and paeonol loading effects

ZHANG Yan<sup>1\*</sup>, XU Li<sup>2</sup>, QIU Shu-Heng<sup>1</sup>, HAN Xue-Ting<sup>1</sup>, ZHU Shuo-Qi<sup>1</sup>,  
FANG Hao-Rui<sup>1</sup>, WANG Bao-Ying<sup>2</sup>, WANG Jian-Chuang<sup>1</sup>

(1. College of Packaging and Printing Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Agricultural Products Preservation Intelligent Packaging Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450046, China)

**ABSTRACT: Objective** To prepare a kind of  $\beta$ -cyclodextrin nanosponge and explore the paeonol loading effects. **Methods** The cyclodextrin nanosponge was prepared by cross-linking, the cross-linking effect were determined through infrared spectrum detection, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis, and the morphology and pore state of nanosponge was analyzed with the scanning electron microscope; the paeonol was loaded onto the nanosponge by immersion, and the loading effect was analyzed through liquid chromatography detection. **Results** Through the infrared spectroscopic analysis, 6 kinds of nanosponge were produced successfully after the cross-linking reaction; the original crystalline structure of  $\beta$ -cyclodextrin disappeared due to the formation of new products; nanosponge had a lower thermal stability than of  $\beta$ -cyclodextrin; 3 kinds of nanosponge with relatively

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(232102111062); 河南省科技攻关项目(232102110133)

第一作者/\*通信作者: 张岩(1972—), 女, 教授, 主要研究方向为食品包装材料及活性包装。E-mail: yanzhang12@yeah.net

complete and uniform pore structure were produced, and their paeonol loading rates were 19.31%, 12.27% and 5.78% respectively. **Conclusion** The produced porous nanosponge has good paeonol loading effect, and can be used in the active packages of food or fresh products.

**KEY WORDS:** nanosponge;  $\beta$ -cyclodextrin; active substance; load; porous material

## 0 引言

随着经济的发展和人口的增加,环境污染和食品浪费问题日益严重。据研究显示,我国生鲜食品因包装缺陷导致的腐败损失率高达 18.7%,其中果蔬类损耗占比超过 40%<sup>[1]</sup>。传统包装材料存在的包装废弃物难降解等缺点亟待改变,天然可降解材料又存在食品易霉、货架期短等缺点。目前,以天然可降解材料作为包装主材料来提升绿色环保性,引入活性物质来提升抑菌保鲜性能受到了广泛的青睐<sup>[2-5]</sup>。然而,活性物质存在难保存、易失活等问题,因此,采用合适的包合物或负载材料来保障其有效性和长效性成为食品活性包装研究的热点<sup>[6-8]</sup>。在活性物质包合或负载材料的选择上,环糊精(cyclodextrin, CD)性能优异,脱颖而出,备受关注<sup>[9]</sup>。

CD 具有独特的结构特征及物理化学性质,已经成为构筑各种功能材料的优良结构单元<sup>[10]</sup>。纳米海绵是由  $\beta$ -环糊精( $\beta$ -cyclodextrin,  $\beta$ -CD)交联而成的多孔材料,具有高比表面积、大孔隙率等特点,能够提高吸附效率和容量<sup>[11]</sup>,在医药、食品、环保等领域具有广阔的应用前景<sup>[12-16]</sup>。丹皮酚是从牡丹皮、芍药或徐长卿等植物中提取的天然活性物质,具有抗氧化效果和较强的抗菌效果,实验表明丹皮酚对草莓中灰霉病的抑制率可达 72.3%<sup>[17-18]</sup>,优于传统化学防腐剂,但因稳定性较差,易被氧化,水溶性差等缺陷限制了其应用领域<sup>[19]</sup>。

根据近期研究证实,基于 CD 的负载体系可使天然活性物质的抗菌活性持续时间延长至 2.8 倍<sup>[20]</sup>。因此,本研究探索环糊精纳米海绵交联制备的方法、孔隙状态以及负载丹皮酚的情况,旨在将天然活性物质与环糊精纳米海绵更好地结合,更好地发挥活性物质的抗菌抗氧化作用,为活性包装的应用提供理论基础和实验数据,为延长食品保鲜期减少腐败浪费提供解决思路和方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

Nicolet iS10 傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); K2025 高效液相色谱仪(山东悟空仪器有限公司); CNW Athena C<sub>18</sub>-WP 液相色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5  $\mu$ m)(上海安谱实验科技股份有限公司); APD 2000PRO X-射线衍射仪(意大利 GNR 分析仪器公司); STA-2500 同步

热分析仪(德国耐驰科学仪器商贸有限公司); ZEISS Sigma 360 场发射扫描电子显微镜(德国蔡司公司)。

碳酸二苯酯(diphenyl carbonate, DPC)(纯度 99%)、羰基二咪唑(N,N'-carbonyldiimidazole, CDI)(纯度  $\geq$  97%)、 $\beta$ -CD(纯度 98%)、丹皮酚(纯度 99%)(上海麦克林生化科技有限公司); N,N-二甲基甲酰胺(N,N-dimethylformamide, DMF)(纯度  $\geq$  99.5%, 郑州派尼化学试剂厂); 三乙胺(triethylamine, TEA)(纯度  $\geq$  98%, 天津市永大化学试剂有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 $\beta$ -环糊精纳米海绵的制备方法

首先将 0.005 mol  $\beta$ -CD 与纯度  $\geq$  99.5% 的 30 mL DMF 加入圆底烧瓶中,按照表 1 的配比分别加入不同种类和摩尔质量的交联剂(DPC 和 CDI),将反应体系放入 90 °C 水浴锅中搅拌 0.5 h,接着加入纯度大于 98% 的 1  $\mu$ L 催化剂 TEA,反应 2 h 后静置至室温<sup>[21-23]</sup>。加水使纳米海绵析出,并加乙醇及水反复洗涤,去除未反应物及一些副产物<sup>[24]</sup>。最后冷冻干燥 24 h 得到 6 种粉块状纳米海绵。

表 1  $\beta$ -CD 纳米海绵的制备配方  
Table 1 Preparation recipe of  $\beta$ -CD nanosponge

| $\beta$ -CD 纳米海绵型号 | $\beta$ -CD 摩尔质量/mol | DPC 摩尔质量/mol | CDI 摩尔质量/mol | DMF 体积/mL | TEA 体积/ $\mu$ L |
|--------------------|----------------------|--------------|--------------|-----------|-----------------|
| 1                  | 0.005                | 0.02         | 0            | 30        | 1               |
| 2                  | 0.005                | 0.03         | 0            | 30        | 1               |
| 3                  | 0.005                | 0.04         | 0            | 30        | 1               |
| 4                  | 0.005                | 0            | 0.03         | 30        | 1               |
| 5                  | 0.005                | 0            | 0.04         | 30        | 1               |
| 6                  | 0.005                | 0            | 0.05         | 30        | 1               |

#### 1.2.2 $\beta$ -环糊精纳米海绵负载丹皮酚方法

将制备得到的环糊精纳米海绵进行红外光谱、热重测试和电子显微镜扫描,根据结果选取孔隙形貌较好的 3 种环糊精纳米海绵进行负载实验,分别是 2 号、5 号和 6 号样品,即  $\beta$ -CD 与 DPC 摩尔比 1:6、 $\beta$ -CD 与 CDI 摩尔比 1:8、 $\beta$ -CD 与 CDI 摩尔比 1:10 的样品进行负载实验。具体操作步骤如下,称取 0.0114 g 丹皮酚样品置于 25 mL 容量瓶中,使用乙醇定容制成质量浓度为 576  $\mu$ g/mL 的丹皮酚溶液,

稀释至 50  $\mu\text{g/mL}$ , 取 10 mL, 将 2.5 g 环糊精纳米海绵浸泡其中, 静止 24 h, 过滤后晾干。

### 1.2.3 丹皮酚负载量的测定方法

#### (1) 液相色谱法测量条件

利用高效液相色谱法测定并计算样品的载药量。液相色谱条件如下: 色谱柱: CNW Athena  $\text{C}_{18}$ -WP 液相色谱柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ ); 流动相: 乙腈-水(50:50,  $V:V$ ); 检测波长: 274 nm; 柱温: 40  $^{\circ}\text{C}$ ; 流速: 1.0 mL/min; 进样体积: 10  $\mu\text{L}$  [25]。

#### (2) 丹皮酚标准曲线

用流动相稀释丹皮酚标准品, 得到质量浓度为 5、15、25、50、100  $\mu\text{g/mL}$  的丹皮酚溶液, 使用液相色谱分别进样, 记录保留时间与峰面积。以质量浓度为横坐标( $X$ ,  $\mu\text{g/mL}$ ), 峰面积为纵坐标( $Y$ ), 进行线性回归分析, 得回归方程为  $Y=45.136X-7.3574$  ( $r^2=0.996$ ), 说明此方法下丹皮酚在 5~100  $\mu\text{g/mL}$  质量浓度范围内线性关系良好。

#### (3) 丹皮酚负载率计算方法

称取已负载丹皮酚的纳米海绵样品 1.5 g, 加入 10 mL 甲醇, 同时制备 2 份, 其中一瓶使用离心机离心(4000 r/min, 5 min), 将纳米海绵表面的未被负载的丹皮酚溶解到甲醇中, 取上清液使用液相色谱测定其中丹皮酚含量; 另一瓶超声 10 min, 使被负载的丹皮酚脱离纳米海绵, 溶解到甲醇中, 取上清液使用液相色谱测定其中丹皮酚含量。使用公式(1)计算负载率 [26]。以上实验需做 3 组, 用于计算平均负载率。

$$\text{负载率}/\% = \frac{\text{超声样品总含量} - \text{离心后总含量}}{\text{超声样品总含量}} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.3 数据处理

本实验设置 3 组平行样品, 采用软件 Excel 2016、Origin 2022 对实验数据进行处理、作图和分析。

## 2 结果与分析

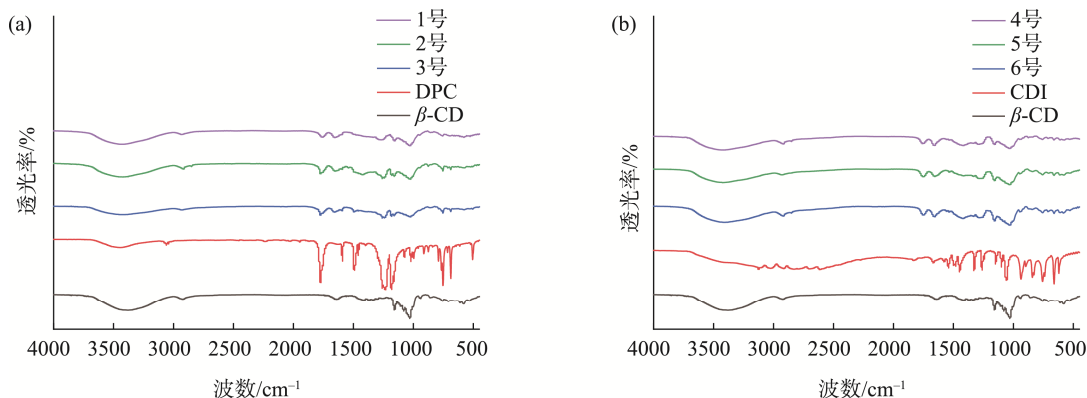
### 2.1 环糊精纳米海绵的表征

#### 2.1.1 傅里叶变换红外光谱分析

如图 1(a)和图 1(b)分别为 DPC 和 CDI 作为交联剂的纳米海绵的红外光谱图。如图 1(a)所示, 纳米海绵在 1710  $\text{cm}^{-1}$  的峰为碳酸酯键的羰基峰 [27], 而  $\beta$ -CD 和 DPC 的红外光谱图在此处无明显峰, 因此纳米海绵成功合成。红外谱图中 3450、1806 和 1660  $\text{cm}^{-1}$  为 -OH、C-O、C-C 伸缩振动峰; 在 1311  $\text{cm}^{-1}$  和 1205  $\text{cm}^{-1}$  的振动峰为 C-H 和 C=C 键的弯曲振动和伸缩振动峰; 在 1234  $\text{cm}^{-1}$  和 1035  $\text{cm}^{-1}$  的振动峰为 C-O-C 的拉伸振动峰。如图 1(b)所示, 纳米海绵在 1760  $\text{cm}^{-1}$  的峰为碳酸酯键的羰基峰,  $\beta$ -CD 和 CDI 的红外光谱图在此处无明显峰, 因此纳米海绵成功合成。红外谱图中 3445、1825 和 1650  $\text{cm}^{-1}$  为 -OH、C-O、C-C 伸缩振动峰; 在 1320  $\text{cm}^{-1}$  和 1210  $\text{cm}^{-1}$  的振动峰为 C-H 和 C=C 键的弯曲振动和伸缩振动峰; 在 1245  $\text{cm}^{-1}$  和 1050  $\text{cm}^{-1}$  的振动峰为 C-O-C 的拉伸振动峰。

#### 2.1.2 X-射线衍射分析

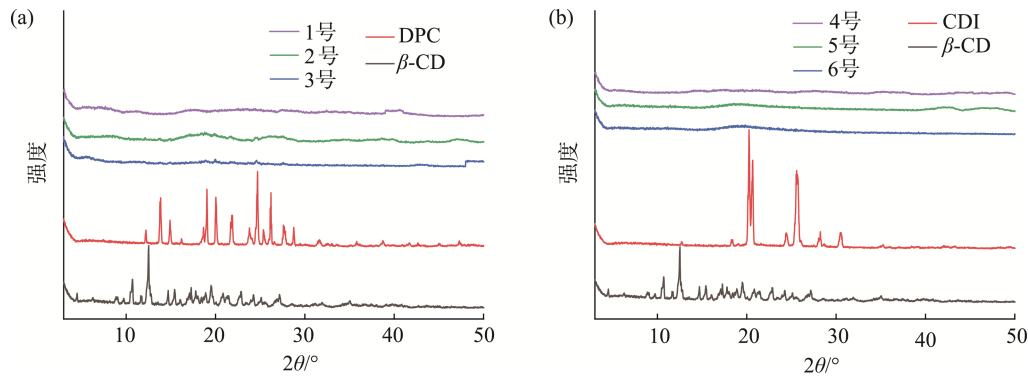
图 2(a)和图 2(b)分别为 DPC 和 CDI 作为交联剂的纳米海绵的 X 射线衍射图。如图 2(a)所示,  $\beta$ -CD 在 10.9 $^{\circ}$ 、12.8 $^{\circ}$ 、15.2 $^{\circ}$ 、18.9 $^{\circ}$ 、22.7 $^{\circ}$  和 27.4 $^{\circ}$  有强烈而尖锐的峰, 因此  $\beta$ -CD 具有极强的结晶性质 [28]。DPC 在 12.9 $^{\circ}$ 、13.9 $^{\circ}$ 、18.2 $^{\circ}$ 、19.1 $^{\circ}$ 、20.3 $^{\circ}$ 、23.7 $^{\circ}$ 、24.8 $^{\circ}$  有尖锐的峰, 因此 DPC 也具有极强的结晶性。而 DPC 和  $\beta$ -CD 交联后, 没有出现  $\beta$ -CD 和 DPC 的晶体峰, 而是仅看到宽的、低强度的且无法清楚识别的峰。因此, 当 DPC 和  $\beta$ -CD 交联后破坏了 DPC 和  $\beta$ -CD 材料的结晶度, 形成没有晶体性的聚集体, 因此证明了 DPC 和  $\beta$ -CD 交联后形成了多孔物质即纳米海绵。



注: (a). 不同摩尔比 DPC 图谱; (b). 不同摩尔比 CDI 图谱。

图 1 环糊精纳米海绵的傅里叶变换红外光谱图谱

Fig.1 Fourier transform infrared spectroscopy profile of cyclodextrin nanosponge



注: (a). 不同摩尔比 DPC 的 X-射线衍射光谱图; (b). 不同摩尔比 CDI 的 X-射线衍射光谱图。

图2 环糊精纳米海绵的 X-射线衍射光谱图

Fig.2 X-ray diffraction spectra of cyclodextrin nanosponges

如图 2(b)所示,  $\beta$ -CD 在  $10.9^\circ$ 、 $12.8^\circ$ 、 $15.2^\circ$ 、 $18.9^\circ$ 、 $22.7^\circ$  和  $27.4^\circ$  有强烈而尖锐的峰, 因此  $\beta$ -CD 具有极强的结晶性质<sup>[28]</sup>。CDI 在  $12.9^\circ$ 、 $13.9^\circ$ 、 $18.2^\circ$ 、 $19.1^\circ$ 、 $20.3^\circ$ 、 $23.7^\circ$ 、 $24.8^\circ$  有尖锐的峰, 因此 CDI 也具有极强的结晶性。而 CDI 和  $\beta$ -CD 交联后, 没有出现  $\beta$ -CD 和 CDI 的晶体峰, 而是仅看到宽的、低强度的且无法清楚识别的峰。因此, 当 CDI 和  $\beta$ -CD 交联后破坏了 CDI 和  $\beta$ -CD 材料的结晶度, 形成没有晶体性的聚集体, 因此证明了 CDI 和  $\beta$ -CD 交联后形成了多孔物质即纳米海绵。

### 2.1.3 热重分析

图 3(a)和图 3(b)为 DPC 和 CDI 作为交联剂的纳米海绵的热重图。如图 3(a)所示, DPC 作为交联剂形成的纳米海绵的热失重曲线分为 3 个阶段, 其中, 第一阶段失重量为  $0\sim 100^\circ\text{C}$  范围内纳米海绵表面吸附的水分子的失去, 失重量较小。第二阶段失重量为  $150\sim 200^\circ\text{C}$  范围内纳米海绵的碳化。第三阶段失重量为  $300\sim 350^\circ\text{C}$  高分子链的断裂, 失重量较大。如图 3(b)所示, CDI 作为交联剂形成的纳米海绵的热失重曲线分为 2 个阶段, 其中, 第一阶段失重量为  $0\sim 100^\circ\text{C}$  范围内纳米海绵表面吸附的水分子的失去, 失重量

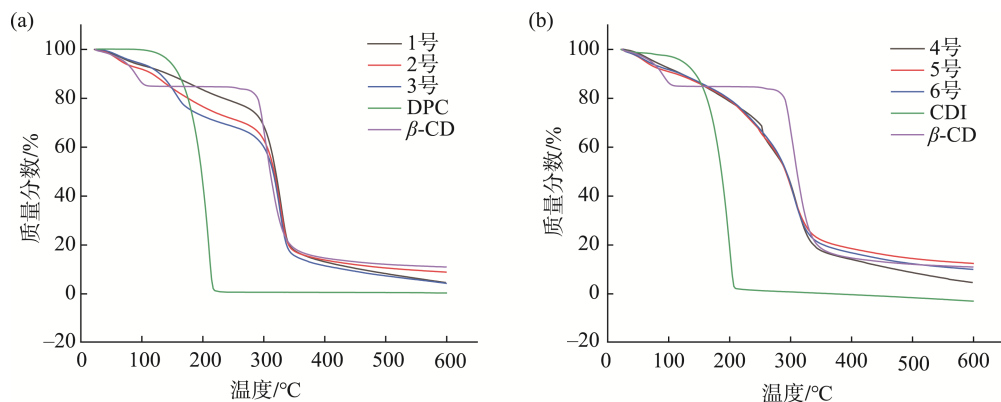
较小。第二阶段失重量为  $100\sim 350^\circ\text{C}$  范围内纳米海绵的高分子链的断裂和分解, 失重量较大。对于两种不同交联剂合成的纳米海绵而言, 在  $200^\circ\text{C}$  以下时, 合成的纳米海绵热稳定性略优于  $\beta$ -CD, 高于  $200^\circ\text{C}$  后, 其热稳定性低于  $\beta$ -CD。

### 2.1.4 扫描电子显微镜分析

不同交联剂、不同摩尔比例的环糊精纳米海绵均呈不规则形状, 且外表面具有多孔结构, 形似海绵。如图 4 所示, 图 4(a)~4(c)是以 DPC 作为交联剂与  $\beta$ -CD 交联摩尔比例分别为 1:4、1:6、1:8 形成的纳米海绵, 图 4(d)~4(f)是以 CDI 作为交联剂与  $\beta$ -CD 交联摩尔比例分别为 1:6、1:8、1:10 形成的纳米海绵。在图 4(a)~4(c)对比可以明显的看出, 交联摩尔比例为 1:6 即图 4(b)形成的孔最多且密实, 因此交联效果是最好的。在图 4(d)~4(f)对比可以明显的看出交联摩尔比例为 1:10 即图 4(f)形成的孔最多且密实, 图 4(e)其次。

## 2.2 环糊精纳米海绵载丹皮酚负载率

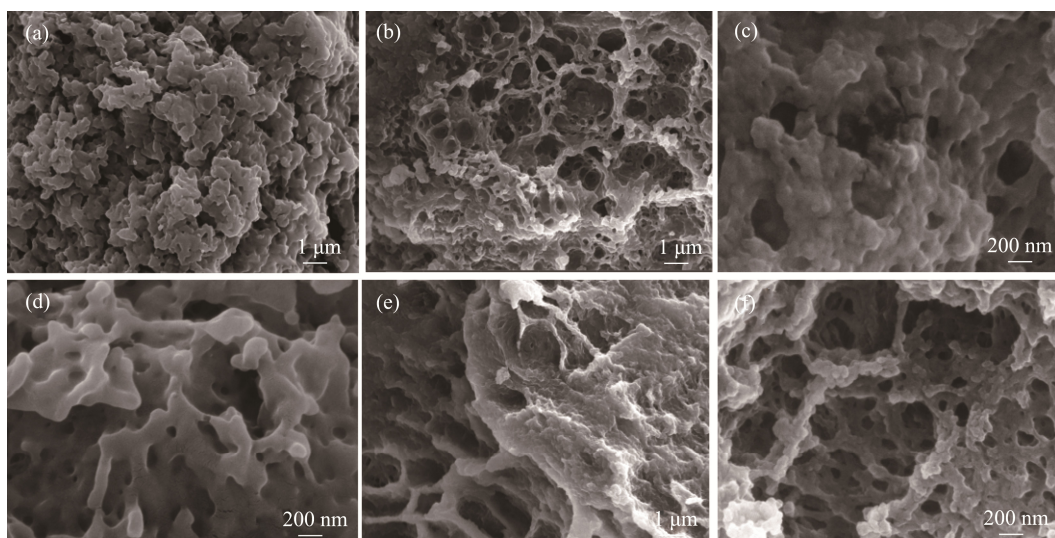
按照 1.2.3 实验方法, 使用标准曲线, 根据公式(1)计算出 3 种纳米海绵对丹皮酚的负载率, 如表 2 所示。



注: (a). 不同摩尔比的 DPC 热重分析曲线; (b). 不同摩尔比 CDI 的热重分析曲线。

图3 环糊精纳米海绵的热重分析曲线

Fig.3 Thermogravimetric analysis curves of cyclodextrin nanosponges



注: (a).  $\beta$ -CD 与 DPC 摩尔比 1:4; (b).  $\beta$ -CD 与 DPC 摩尔比 1:6; (c).  $\beta$ -CD 与 DPC 摩尔比 1:8; (d).  $\beta$ -CD 与 CDI 摩尔比 1:6; (e).  $\beta$ -CD 与 CDI 摩尔比 1:8; (f).  $\beta$ -CD 与 CDI 摩尔比 1:10.

图 4 环糊精纳米海绵的扫描电子显微镜图

Fig.4 Scanning electron microscope image of cyclodextrin nanosponge

表 2 环糊精纳米海绵载丹皮酚负载率  
Table 2 Loading rate of cyclodextrin nanosponge with paeonol

| 样品                       | 离心后样品含量<br>/( $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) | 超声样品总含量<br>/( $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) | 负载率/% | 标准差/% | 平均负载率/% |
|--------------------------|---|---|-------|-------|---------|
| $\beta$ -CD:DPC 摩尔比 1:6  | 6.682                                   | 7.601                                   | 12.09 | 0.28  | 12.27   |
|                          | 6.440                                   | 7.369                                   | 12.60 |       |         |
|                          | 6.153                                   | 7.003                                   | 12.13 |       |         |
| $\beta$ -CD:CDI 摩尔比 1:8  | 5.757                                   | 7.146                                   | 19.44 | 0.21  | 19.31   |
|                          | 5.705                                   | 7.079                                   | 19.41 |       |         |
|                          | 5.921                                   | 7.316                                   | 19.07 |       |         |
| $\beta$ -CD:CDI 摩尔比 1:10 | 7.780                                   | 8.300                                   | 6.27  | 0.42  | 5.78    |
|                          | 7.850                                   | 8.310                                   | 5.54  |       |         |
|                          | 7.880                                   | 8.340                                   | 5.52  |       |         |

交联剂和 CD 的配比是影响环糊精纳米海绵孔结构的关键因素, 因此, 不同交联剂配比的环糊精纳米海绵对丹皮酚的负载率影响极大。本研究分别以 CDI 和 DPC 作为交联剂, 与 CD 形成纳米海绵。其中,  $\beta$ -CD:CDI=1:8 组的平均负载率最高, 为 19.31%, 其离心后样品含量与超声样品总含量的比值表明该配比下药物与载体的结合效率较优。而  $\beta$ -CD:DPC=1:6 组的负载率平均值为 12.27%, 其 3 次独立测量的负载率分别为 12.09%、12.60%和 12.13%。这是由于 CDI 结构中的 O 无空间位阻效应(如图 5 所示), CDI 和 CD 之间的交联强。因此,  $\beta$ -CD:CDI=1:8 的负载率较高。而 DPC 结构中的 O 位于苯环中间, 有极强的刚性空间位阻效应<sup>[29]</sup>(如图 6 所示), 影响 DPC 和 CD 的交联, 因此,  $\beta$ -CD:DPC=1:6 的负载率较低。此外,  $\beta$ -CD:CDI=1:10 组的平均负载率显著降低至 5.78%, 这是由于 CDI 含量过高, 交联剂部分残留, 残留的交联剂易团聚, 使得交联剂只起

到扩链的作用而达不到交联的效果, 交联反应不完全且交联程度较低, 导致 CDI 和 CD 的交联降低。因此, 纳米海绵的孔尺寸会减小<sup>[30]</sup>(如图 4e 和 4f 所示), 丹皮酚的负载率降低。以上结果说明, 环糊精纳米海绵中 CD 和交联剂的配比对丹皮酚的负载性能具有关键影响, 这一发现为基于环糊精纳米海绵的药物递送系统设计提供了实验依据。

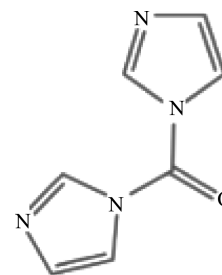


图 5 CDI 的结构  
Fig.5 Structure of CDI

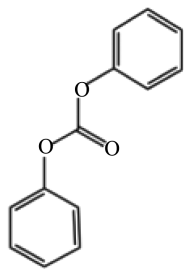


图 6 DPC 的结构  
Fig.6 Structure of DPC

### 3 结 论

本研究成功制备了负载丹皮酚的  $\beta$ -CD 纳米海绵, 并探索了不同交联剂摩尔比对纳米海绵性能的影响。通过傅里叶变换红外光谱、X-射线衍射以及热重分析等手段对制备的环糊精纳米海绵进行了表征, 结果显示所制备的纳米海绵具有预期的结构特征。

在制备过程中, 发现通过调整 CD 与交联剂(DPC 和 CDI)的摩尔比, 可以影响纳米海绵的形貌和性能。特别是当 CD 与 DPC 或 CDI 的摩尔比适当时, 能够制备出具有高比表面积和大孔隙率的纳米海绵, 这些特性有利于提高丹皮酚的负载量和缓释性能。

进一步, 利用高效液相色谱法, 通过对比离心和超声处理后的样品含量, 证实了纳米海绵对丹皮酚的负载效果。这些结果表明,  $\beta$ -CD 纳米海绵作为植物源活性物质的有效载体, 具有在食品保鲜领域应用的潜力。

综上所述, 本研究为开发新型环保、高效的食品保鲜材料提供了新思路。未来, 将进一步优化纳米海绵的制备工艺, 并深入研究其在食品保鲜中的应用效果, 以期为实现食品的绿色环保贮藏和延长货架期提供科学依据。

### 参考文献

- [1] 杨传文, 邢帆, 朱建春, 等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与减排潜力[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1149–1162.  
YANG CW, XING F, ZHU JC, *et al.* Spatio-temporal distribution of straw resources in China, current utilization status and carbon emission reduction potential [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1149–1162.
- [2] 赵冬梅, 初小宇, 张勇, 等. 基于纤维素的食物包装材料的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 432–439.  
ZHAO DM, CHU XY, ZHANG Y, *et al.* Research progress on cellulose-based food packaging materials [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 432–439
- [3] HUANG GL, MEI XY, HU JC. The antioxidant activities of natural polysaccharides [J]. Curr Drug Targets, 2017, 18(11): 1296
- [4] ZHOU Y, CHEN XQ, CHEN TT, *et al.* A review of the antibacterial activity and mechanisms of plant polysaccharides [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 264–280.
- [5] SEIDI F, SHAMSABDI AA, AMINI M, *et al.* Functional materials generated by alloying cyclodextrin-based supramolecular chemistry with living polymerization [J]. Polymer Chemistry, 2019, 10(27). DOI: 10.1039/C9PY00495E
- [6] WANG YY, DONG XL, ZANG JX, *et al.* Antibiotic residues of drinking-water and its human exposure risk assessment in rural Eastern China [J]. Water Research, 2023, 236: 119940.
- [7] ONG HT, SAMSUDIN H, SOTO-VALDEZ H. Migration of endocrine-disrupting chemicals into food from plastic packaging materials: An overview of chemical risk assessment, techniques to monitor migration, and international regulations [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(4): 957–979.
- [8] CHEIF LM, AYED N, HORRICHÉ J, *et al.* Characterization of plastic packaging additives: Food contact, stability and toxicity [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10: 1938–1954.
- [9] 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 等. 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 907–919.  
ZHAO CL, WANG ZJ, YAN Y, *et al.* Adsorption performance and host-guest effect of cyclodextrin porous polymers on dye molecules in water [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 907–919.
- [10] 王乐, 闫宇壮, 方天驰, 等. 新型食品包装材料研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 259–263.  
WANG L, YAN YZ, FANG TC, *et al.* Progress in research on new food packaging materials [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 259–263.
- [11] USLU EK, YLMAZ E. Physical, structural and rheological properties of  $\gamma$ -cyclodextrin metal-organic framework emulgels [J]. Acta Alimentaria, 2023, 51(4): 594–604.
- [12] JAFAI G, RAISSI H, SABERINA SA, *et al.* Phosphatidylcholine in the tear film of the eye: Enhanced topical delivery of fluoro metholone to the eye [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 150: 110506.
- [13] LIANG BC, HAO JX, ZHU N, *et al.* Formulation of nitrendipine/hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex as a drug delivery system to enhance the solubility and bioavailability by supercritical fluid technology [J]. European Polymer Journal, 2023, 187: 111880.
- [14] ZHANG K, HE Y, DAI Y, *et al.* Cyclodextrin membranes prepared by interfacial polymerization for separation [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 492: 152165.
- [15] LIU X, JIANG W, GOU S, *et al.* Synthesis and clay stabilization of a water-soluble copolymer based on acrylamide, modular  $\beta$ -cyclodextrin, and AMPS [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013(128): 3398–3404.
- [16] ZHONG H, SUN B. Application of multi-indicator analysis on synthesis of super absorbent polymer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 67–73.
- [17] XIA T, LIU W, YANG L. A review of gradient stiffness hydrogels used in tissue engineering and regenerative medicine [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2017, 105(6): 1799–1812.
- [18] 陈雨桐. 丹皮酚对草莓采后病原菌的抑制效应及机理[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 112–119.

- CHEN YT. Inhibition effect and mechanism of paeonol on postharvest paeonol pathogenic bacteria in strawberry [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(4): 112–119.
- [19] 杨进明, 陈根强, 田月娥, 等. 丹皮酚类化合物及其生物活性研究进展[J]. *化学通报*, 2021, 84(8): 776–786.
- YANG JM, CHEN GQ, TIAN YE, *et al.* Research progress on paeonia phenolic compounds and their biological activities [J]. *Chemistry*, 2021, 84(8): 776–786.
- [20] 张巧骞. 静电纺丝法制备丹皮酚复合纳米纤维及其防腐性能的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2021.
- ZHANG QQ. Study on the preparation of paeonol composite nanofibers by electrospinning and their anti-corrosion properties [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2021.
- [21] 周海涛. 环糊精缓释抗菌膜的制备与性能评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(2): 76–83.
- ZHOU HT. Preparation and performance evaluation of cyclodextrin-based sustained-release antimicrobial film [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(2): 76–83.
- [22] 乔宗梅.  $\beta$ -环糊精纳米海绵的合成及应用于对硝基苯酚的吸附研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- QIAO ZM. Synthesis of  $\beta$ -cyclodextrin nanosponges and their application in the adsorption study of p-nitrophenol [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [23] 徐江慧. 环糊精纳米海绵及其蒿甲醚载药系统研究[D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2017.
- XU JH. Study on cyclodextrin nanosponge and its artemether drug-loading system [D]. Hefei: Anhui University of Traditional Chinese Medicine, 2017.
- [24] 乔宗梅, 张阳倩, 张毅民. 微波辅助制备 $\beta$ -环糊精纳米海绵[J]. *精细化工*, 2020, 37(6): 1171–1177.
- QIAO ZM, ZHANG YQ, ZHANG YM. Microwave-assisted preparation of  $\beta$ -cyclodextrin nanosponge [J]. *Fine Chemicals*, 2020, 37(6): 1171–1177.
- [25] 陈晓旭, 安劼, 张睿, 等. 高效液相色谱法测定清热固经丸中丹皮酚的含量[J]. *天津药学*, 2024, 36(6): 16–18.
- CHEN XX, AN J, ZHANG R, *et al.* Determination of paeonol content in qingre gujing pills by high performance liquid chromatography [J]. *Tianjin Pharmaceutical Sciences*, 2024, 36(6): 16–18.
- [26] 李流星.  $\beta$ -环糊精纳米海绵的制备及对碱性红 46 和罗丹明 B 的吸附研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- LI LX. Preparation of  $\beta$ -cyclodextrin nanosponge and adsorption of basic red 46 and rhodamine B [D]. Hengyang: South China University, 2020.
- [27] TANG WT, FANG MF, LIU X, *et al.* Simultaneous quantitative and qualitative analysis of flavonoids from ultraviolet-B radiation in leaves and roots of *scutellaria baicalensis georgi* using LC-UV-ESI-Q/TOF/MS [J]. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2014. DOI: 10.1155/2014/643879
- [28] KIASAT AR, NAZARI S. Application of cyclodextrin-polyurethane as a stationary microvessel and solid liquid phase-transfer catalyst: Preparation of benzyl cyanides and azides in water [J]. *Catalysis Communications*, 2012, 18: 102–105.
- [29] 丁培杰, 郑扬, 王嘉晨, 等. 空间位阻对环磷腈热可逆树脂交联行为的影响研究[J]. *化工新型材料*, 2025, 4: 1–7.
- DING PJ, ZHENG Y, WANG JC, *et al.* Study on the effect of steric hindrance on the crosslinking behavior of cyclophosphazene thermoreversible resin [J]. *New Chemical Materials*, 2025, 4: 1–7.
- [30] 黄乔娜, 徐广威, 周玉航, 等. 交联型水性聚氨酯涂料的制备及其性能[J]. *合成树脂及塑料*, 2025, 42(1): 7–13, 21.
- HUANG QN, XU GW, ZHOU YH, *et al.* Preparation and properties of cross-linked waterborne polyurethane coatings [J]. *Synthetic Resins and Plastics*, 2025, 42(1): 7–13, 21.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)