

原儿茶醛基纳米载药微球制备及性能研究

李旭喆¹, 赵传城¹, 胡勇¹, 刘丽华¹, 苏宇², 尚宏周^{1*}
(1. 华北理工大学材料科学与工程学院, 河北唐山 063210;
2. 华北理工大学人事处, 河北唐山 063210)

摘要: 采用 KH570 对纳米介孔硅表面进行硅烷偶联, 然后与丙烯酰氯原儿茶醛进行共聚反应, 制备 PCA-MSNs, 其颗粒尺寸为 180 nm, 平均孔径为 2.84 nm。最后以姜黄素为药物模型, 探究药物载体吸附和释药性能。实验结果表明, 当 PCA-MSNs 用量为 6 mg、载药温度为 37℃、初始质量比为 6:3 时, 饱和载药量最大, 为 24.71%, 体外累积释药率为 19.54%。

关键词: 介孔硅纳米粒子; 原儿茶醛; 丙烯酰化; 药物载体

中图分类号: TB383

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0111-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.020

Preparation and properties of protocatechualdehyde-based nano drug-loaded microspheres

LI Xu-zhe¹, ZHAO Chuan-cheng¹, HU Yong¹, LIU Li-hua¹, SU Yu², SHANG Hong-zhou^{1*}

(1. College of Materials Science and Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Personnel Department, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: PCA-MSNs with particle size of 180nm and average pore size of 2.84 nm were prepared by silane coupling on the surface of nano mesoporous silicon with KH570 and copolymerization with acryloyl chloride-protocatechualdehyde. Finally, curcumin was used as a drug model to explore the adsorption and release properties of drug carriers. The experimental results showed that when the dosage of PCA-MSNs was 6 mg, the drug loading temperature was 37℃, and the initial mass ratio was 6:3, the maximum saturated drug loading was 24.71%, and the cumulative drug release rate in vitro was 19.54%.

Key words: mesoporous silicon nanoparticle; protocatechualdehyde; acrylation; drug carrier

癌症是一种对人类健康有重大影响的疾病, 预计 2035 年全球每年新增的癌症病例数量将会突破 800 万例^[1]。这种由多维度致病因素所驱动的疾病, 已然成为我国公共卫生领域面临的重大挑战, 面对如此高的致死率以及患癌病人, 研发出高效低毒的肿瘤干预方案显得极为迫切^[2]。

以纳米技术为基础的药物传输系统不仅能够提高治疗效果, 而且能够降低副作用^[3], 在癌症治疗和诊断中受到了极大的关注。在众多应用的纳米药物载体中, MSNs 凭借其更大的生物相容特性、更高的比表面积、孔径可调节的优势、高效的药物装载效率以及表面具有活泼性的功能性修饰潜力, 已然成为纳米药物递送领域的一项关键技术^[4-7], 近几年来, 围绕介孔二氧化硅材料的可控封闭与释放原理构建的智能药物传输体系, 成了材料科学与生物医药交叉领域的前沿研究热点。该策略是在其表面构建有环境敏感特性的封堵剂, 精确封闭纳米孔道, 借

助 MSNs 内部空腔高效负载治疗分子, 之后凭借表面工程引入多维度刺激响应基团, 形成精密的“纳米级控释阀门”, 这一设计能保证药物分子在正常生理微环境里实现“零提前泄漏”, 而在到达病灶部位后, 凭借特定病理信号像 pH、酶浓度、氧化还原电位等触发精准释放, 以此提升靶区药物累积浓度与疗效精准度。同时临床前研究数据说明, 未经修饰的纳米载体在肿瘤部位的被动蓄积量一般仅占注射剂量的 1%~5%, 远远低于实现治疗响应所需的阈值浓度, 这成为限制被动靶向化疗疗效的主要瓶颈, 开发兼具被动富集与主动靶向功能的复合递送策略, 已然成为提升肿瘤药物递送效率的关键研究方向^[8-11]。

本项目以具有生物活性的原儿茶醛(PCA)为母体, 引入不饱和双键, 然后在介孔硅表面进行聚合, 形成具有核壳结构的药物缓释载体, 并以姜黄素为药物模型, 探讨药物缓释载体的吸附和缓释性能。

收稿日期: 2026-03-26; 修回日期: 2026-06-12

基金项目: 国家级大创项目(202310081015); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN20231123)

作者简介: 李旭喆(2003-), 男, 本科生, 研究方向为功能高分子材料, 2669248918@qq.com; 尚宏周(1982-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为功能高分子材料, 通讯联系人, zhouzhou198213@163.com。

1 实验部分

1.1 原儿茶醛改性介孔硅纳米粒子的制备

1.1.1 介孔硅纳米粒子(MSNs)的制备

在 500 mL 三口烧瓶中分别加入一定量的去离子水、3.5 mL 的 NaOH 溶液(2.0 mol/L)和 1.0 g 的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)进行磁力搅拌混合均匀,升温到 80℃ 后缓慢滴加 5 mL 正硅酸乙酯,反应 3 h。粗产物分别采用无水乙醇和蒸馏水交替洗涤 3 次,进行离心分离。为了得到介孔二氧化硅,将 1.0 g 含有模板剂的 MSNs 加入盛有盐酸-甲醇混合液(体积比例 1:20)中,在 60℃ 条件下回流 12 h,最后产物经离心、洗涤和真空干燥,得到介孔二氧化硅(MSNs)^[12-13]。

1.1.2 KH-570 改性介孔硅纳米粒子的制备

将 MSNs 倒入盛有无水甲苯的三口烧瓶中,向其中加入 γ -甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH-570),逐渐升温至 100℃,然后回流反应 24 h,待反应结束后用甲醇反复洗涤、离心、真空干燥,制备出 KH-570 改性的介孔硅纳米粒子(KH570-MSNs)^[14]。

1.1.3 3,4-双(丙烯酰氧基)苯甲醛(PCA)的制备

取 1.0 g 原儿茶醛溶于装有 25 mL 四氢呋喃的三口烧瓶中,搅拌 30 min 至完全溶解,然后滴加 1.2 mL 丙烯酰氯,待反应 30 min 后再加入 1.0 mL 三乙胺,反应结束后过滤除去杂质留下清液。粗产物先加入饱和碳酸氢钠溶液进行混合,然后加入二氯甲烷并将其移至分液漏斗中进行分离,然后旋蒸除去部分溶剂后进行真空干燥,最后得到产物 3,4-双(丙烯酰氧基)苯甲醛^[15]。其合成路线见图 1。

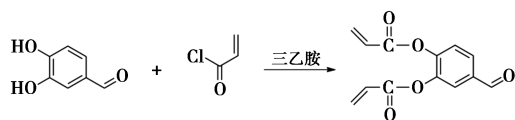


图 1 3,4-双(丙烯酰氧基)苯甲醛合成路线

1.1.4 改性原儿茶醛和 KH-570 改性介孔硅纳米粒子的聚合

将 1.0 g KH570 改性后的介孔硅纳米粒子(KH570-MSNs)放入盛有 20 mL 的乙醇溶液的烧杯中超声分散 40 min。同时将 0.01 g 改性后的原儿茶醛放入盛有 20 mL 的乙醇溶液的烧杯中搅拌 20 min。待 KH570-MSNs 充分分散在乙醇溶液中,将二者分别倒入三口烧瓶中并进行搅拌,通氮除氧并升温至 60℃,待反应 1 h 后加入引发剂亚硫酸钠

和过硫酸钾,继续反应 6 h。待反应结束后用蒸馏水洗涤,离心干燥后所得药品为原儿茶醛改性介孔硅纳米粒子(PCA-MSNs)。

1.2 吸附性能分析

1.2.1 配制 1% CTAB 的盐酸溶液

用电子天平称取 1.5 g 的 CTAB,将其倒入盛有 500 mL 去离子水的烧杯中并放入转子,然后将烧杯放置在磁力搅拌器上进行搅拌,待 CTAB 完全溶解;用移液枪量取 5 mL 的浓盐酸,缓慢滴入烧杯中,在滴入浓盐酸的过程中持续搅拌,同时用 pH 计监测溶液的 pH,待 pH 为 1 时停止滴入。将溶液转移至 500 mL 棕色容量瓶中,定容至 500 mL。盖紧瓶塞,反复颠倒摇匀 15~20 次,确保溶液混合均匀且无气泡残留^[16]。将配制好的溶液存放于避光处备用。

1.2.2 标准曲线绘制

选用姜黄素作为模型药物,精密称取 5.0 mg 的姜黄素于 50 mL 的棕色容量瓶中,用 CTAB 的盐酸溶液定容,得到质量浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$ 的储备液 A。为避免光降解影响实验结果,该储备液需在避光条件下妥善保存;稀释得到质量浓度为 2.0 $\mu\text{g/mL}$ 的药物溶液,以 CTAB 的盐酸溶液为空白对照,利用 UV-1900i 型紫外-可见分光光度计确定姜黄素的检测波长,波长扫描范围为 200~500 nm。量取姜黄素储备液配制成质量浓度分别为 10.0、20.0、30.0、40.0、50.0、60.0、70.0 $\mu\text{g/mL}$ 的一系列标准溶液,查阅相关资料以及测试所得姜黄素最大吸收波长为 325 nm。采用紫外分光光度法测定波长为 325 nm 的吸光度,并建立标准曲线回归方程,结果见图 2。

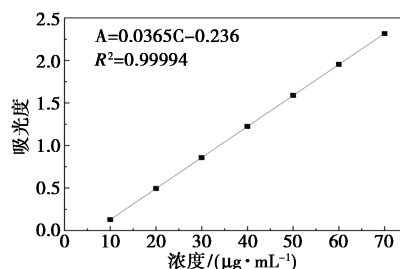


图 2 姜黄素标准曲线

其拟合方程为如式(1)所示, R^2 为 0.999 94,拟合度较高。

$$A = 0.0365C - 0.236 \quad (1)$$

式中:A 为吸光度;C 为姜黄素的浓度, $\mu\text{g/mL}$;R 为相关系数。

1.2.3 载药性能测试

将 PCA-MSNs 与姜黄素按不同质量比 6:1、

6:2、6:3、6:4和 6:5 投放到 50 mL 的十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 的盐酸溶液当中,其中取 5 份 6 mg 的 PCA-MSNs,然后分别取姜黄素 1、2、3、4 mg 和 5 mg。将其按质量比分别放入不同烧杯并标明质量比,并将 5 个烧杯放置在磁力搅拌器上搅拌 48 h。待搅拌完成后对其进行离心,离心完成后取上层清液,对 5 个清液分别进行紫外光谱检测,并记录其在 325 nm 的吸收度。

1.2.4 载药量计算公式

计算载药量的计算公式如(2)所示。

$$\text{载药率}(\%) = [(m_0 - m_1)/m_2] \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 为开始投放姜黄素的质量; m_1 为游离的姜黄素的质量; m_2 为载体与其搭载姜黄素的总质量。

1.2.5 包封率(EN)计算公式

包封率的计算公式如(3)所示。

$$\text{EN}\% = (1 - C_f/C_t) \times 100\% \quad (3)$$

式中: C_f 为游离药物的量; C_t 为药物总量。

1.3 PCA-MSNs 释药性能

将 PCA-MSNs 与姜黄素按照所测得载药量最高的质量比进行测试,将样品溶于十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 的盐酸溶液中,并将其溶液倒入透析袋内,密封后将其置于离心管内,并向其中加入十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 的盐酸溶液,并将离心管放在恒温水浴摇床中振荡,设置温度 37℃,振荡期间保持避光,避免姜黄素遇光分解。振荡 72 h 并且在指定时间点取出 1.5 mL,释放介质,同时加入 1.5 mL,对应 pH 的新鲜十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 的盐酸溶液,使用分光光度计测量释放介质中姜黄素的吸光度,计算各实验组的累积释药率。

1.4 改性原儿茶醛表征测试

1.4.1 红外光谱分析 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

采用溴化钾压片法,利用美国 Thermo Scientific Nicolet iS20 型傅里叶红外光谱仪分析 MSNs 和 PCA-MSNs 的官能团,光谱仪扫描范围设定为 500~4 000 cm^{-1} 。

1.4.2 扫描电镜分析 (Scanning Electron Microscope, SEM)

采用 S4800 型 SEM 观察 PCA-MSNs 的样品表面形貌。

1.4.3 透射电镜分析 (Transmission Electron Microscope, TEM)

利用美国 FEI Talos F200X G2 型 TEM 对 PCA-

MSNs 的微观形貌进行观察,对 PCA-MSNs 的电镜图进行分析测量。

1.4.4 X 射线衍射 (X-ray Powder diffractometer)

采用德国 Bruker D2 Phaser 型 X 射线衍射仪对 MSNs、PCA-MSNs 的晶型情况进行分析,测试角度范围 5~90°。

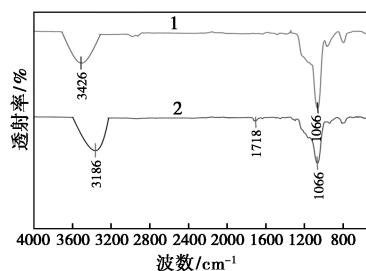
1.4.5 BET 分析

采用美国 Micromeritics ASAP 2460 型比表面积的分析仪,设置条件脱气温度 120℃ 时间 24 h,样品合成温度是 60℃,分解温度为 300℃,并对其进行氮气吸附,对 PCA-MSNs 的比表面积、孔径和孔体积进行分析。

2 结果与讨论

2.1 MSNs 和 PCA-MSNs 的 FT-IR 分析

FT-IR 对 MSNs 以及 PCA-MSNs 表面基团进行表征,结果见图 3。从图中可以看到,MSNs 图片中 3 426 cm^{-1} 是 MSNs 中酚羟基的伸缩振动峰,1 066 cm^{-1} 是 Si—O—Si 不对称伸缩振动峰^[17];而在 PCA-MSNs 图谱中,其 3 186 cm^{-1} 是其酚羟基的伸缩振动峰,1 718 cm^{-1} 处为丙烯酰氯优先与酚羟基反应所残留的部分原儿茶醛中醛基的伸缩振动峰(羧基峰)。通过分析 PCA-MSNs 和 MSNs 的红外谱图,可以看出 PCA-MSNs 在 1 066 cm^{-1} 处的峰强度明显变弱,说明 KH570 对介孔硅成功改性^[18]。



1—MSNs; 2—PCA-MSNs

图 3 MSNs 与 PCA-MSNs 的 FT-IR 图

FT-IR 对改性原儿茶醛的表面基团进行表征,结果见图 4。从图中可以看出在 1 745 cm^{-1} 处是酯

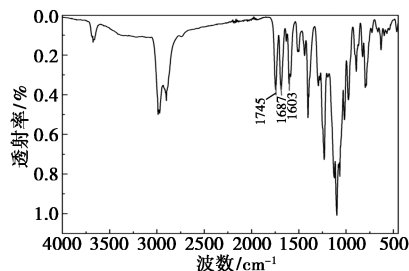


图 4 改性原儿茶醛的 FT-IR 图

基的伸缩振动峰,表明丙烯酰基成功接入酚羟基;
1 603 cm^{-1} 处是碳碳不饱和双键的伸缩振动峰,表明
丙烯酰氯成功原儿茶醛进行反应^[19]。

2.2 PCA-MSNs 的电镜分析

采用 SEM 对 PCA-MSNs 的颗粒微观形貌进行分析,结果见图 5。通过 SEM 发现,PCA-MSNs 表面为椭圆形,尺寸均一,分散相对均匀,尺寸 180 nm 左右。从表面特征来看,其表面光滑,保留了介孔硅相对规整的表面特性,有利于维持其原有功能特性^[20]。

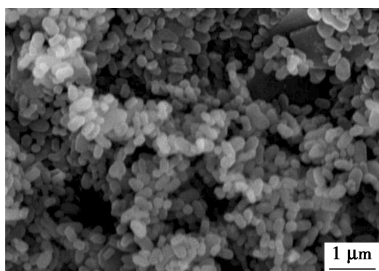
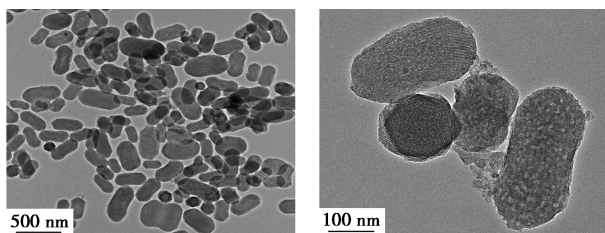


图 5 PCA-MSNs 的 SEM 图

利用美国 FEI Talos F200X G2 型 TEM 对 PCA-MSNs 的微观形貌进行观察,结果见图 6。从图中可以看出 PCA-MSNs 的整体分散性良好,其颗粒近似椭圆形,无明显团聚分布相对均匀。高倍图可以看出颗粒边缘轮廓清晰,形状趋于不规则且部分颗粒表面呈现明显的褶皱或纹理结构,表明材料内部存在丰富的介孔孔道,改性后仍保持其介孔结构^[21]。



(a) TEM 图

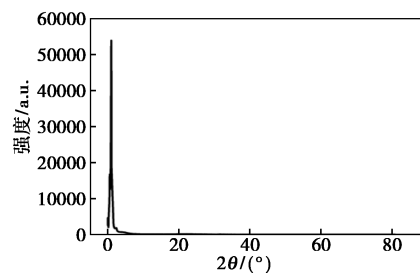
(b) TEM 图

图 6 PCA-MSNs 的 TEM 图

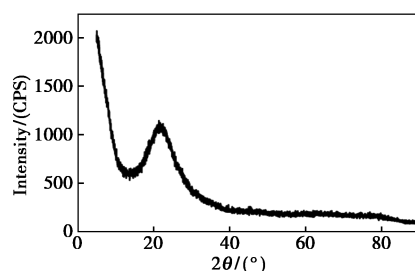
2.3 PCA-MSNs 的 XRD 分析

利用 XRD 对 MSNs 以及 PCA-MSNs 进行晶型结构分析,结果见图 7。通过该图可以看到,在靠近 0° 附近有一个非常强且尖锐的峰,这表明介孔硅 (MSNs) 具有高度有序的介孔结构。介孔硅的这种强衍射峰通常对应于其特征的孔道结构排列,说明其孔道在一定程度上具有规则性和周期性。改性后的介孔硅 (PCA-MSNs) 除了在 MSNs 峰附近有响应外,在稍大衍射角处出现了新的峰。这是由于改性过程中引入了新的基团即丙烯酰氧基等,同时可以

看出其保留了较好的介孔结构^[22]。



(a) MSNs 的 XRD 图

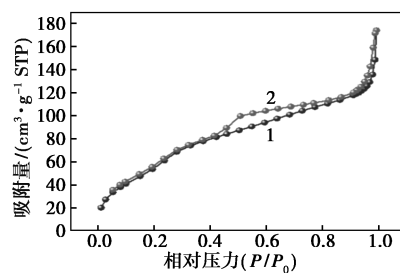


(b) MSNs 的 XRD 图

图 7 MSNs 与 PCA-MSNs 的 XRD 图

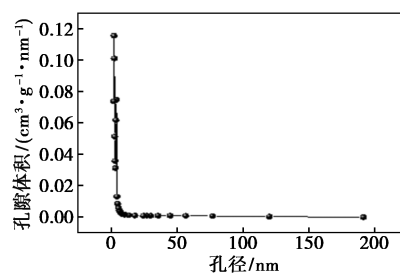
2.4 PCA-MSNs 的 BET 分析

PCA-MSNs 的 BET 数据见图 8 和表 1。根据 IUPAC 分类标准,图 8 曲线呈现典型的 I 型等温线特征,并伴有明显的回滞环现象,表明样品中存在介孔结构^[23]。进一步分析显示,该回滞环属于 H4 型,通常与狭缝状孔结构相关。由 BET 上述表 1 得该样品的比表面积为 281.39 m^2/g ,总孔体积为 0.269 cm^3/g ,平均孔径为 2.84 nm。



1—吸附;2—解吸

(a)



(b)

图 8 PCA-MSNs 的 BET 图

表 1 PCA-MSNs 的 BET 数据

样品	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔径/nm	孔体积/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
PCA-MSNs	281.3870	2.8429	0.2693

2.5 载药量与包封率分析

根据实验所测得的载药量发现,PCA-MSNs 与姜黄素在不同质量比下的载药性能呈现显著差异,结果见表 2。从表数据中可以看出当 PCA-MSNs 与姜黄素质量比为 6:3 的时候载药量(DLC)达到峰值为 24.71%,其包封率为 33.33%。而质量比为 6:1 和 6:2 时载药量和包封率均较低,分别低于 3.5% 和 3.8%^[24],因此后续实验采用 6:3 的质量比来做药物缓释实验。

表 2 PCA-MSNs 与姜黄素不同质量比的载药量和包封率

质量比	载药量/%	包封率/%
6:1	2.31	1.32
6:2	3.43	3.77
6:3	24.71	33.33
6:4	18.32	24.36
6:5	17.65	18.43

2.6 体外释药性能分析

将 PCA-MSNs 与姜黄素按质量比 6:3 溶于 CTAB 的盐酸溶液中,并将其溶液倒入透析袋内,密封后将其置于离心管内,并向其中加入 CTAB 的盐酸溶液,并将离心管放在恒温水浴摇床中振荡,设置温度 37℃,振荡期间保持避光,避免姜黄素遇光分解。振荡 72 h 并且在指定时间点取出 1.5 mL,释放介质,同时加入 1.5 mL 对应 pH 的 CTAB 的盐酸溶液,使用紫外分光光度计测量释放介质中姜黄素的吸光度,计算各实验组的累积释药率,结果见图 9。通过图 9 可以看出,PCA-MSNs 的药物释放率随时间增长而增长,在 0~5 h 的时候累计释放率比较缓慢,5~24 h 的时候累计释放率呈直线型上升,而在 24~48 h 的时候释放速度变慢,在 48~72 h 的时候累计释放率趋于平稳达到最大值 19.54%。

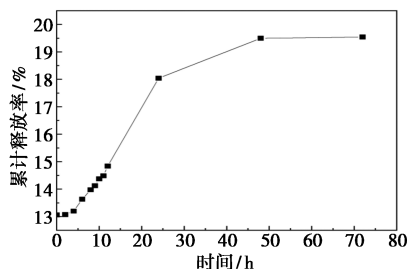


图 9 PCA-MSNs 累计释药曲线

3 结论

通过化学改性的方法成功制备出了原儿茶醛改性介孔硅纳米粒子(PCA-MSNs),通过多种表征手段对制备出的产品进行检测,并对其载药性能和体外释药性能进行了研究。主要结论如下。

(1)以十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)为模板,制备介孔硅纳米粒子,再与改性后的原儿茶醛反应成功制备出 PCA-MSNs。通过 FT-IR、SEM 和 TEM 分析其结构。颗粒呈椭圆形,表面较为光滑,尺寸在 180 nm 左右。

(2)BET 分析介孔结构的比表面积为 281.39 m^2/g ,总孔体积为 0.269 cm^3/g ,样品平均孔径为 2.84 nm。

(3)载药量与包封率在 PCA-MSNs 与姜黄素质量比为 6:3 时,均达到最大值,其中载药量为 24.71%,包封率为 33%。PCA-MSNs 在体外释药测试中,其最高累计释放率为 19.54%。表明 PCA-MSNs 具备一定的药物控释能力。

参考文献

- [1] 吴雅欣.介孔硅药物递送系统的构建及多疗法协同抗肿瘤研究[D].太原:山西大学,2024.
- [2] 韩凯硕,任婷,李多,等.介孔硅纳米载体应用于肿瘤治疗的研究进展[J].化学试剂,2023,45(9):1-10.
- [3] 冯易.肿瘤微环境响应型介孔硅纳米药物用于协同抗肿瘤研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [4] 袁一方,屈爽,白华,等.介孔硅纳米粒子在生物医学领域应用的研究进展[J].解放军医学院学报,2021,42(8):881-884.
- [5] 颜悦.功能化介孔硅基材料的制备及其载药与催化性能[D].杭州:浙江大学,2018.
- [6] 袁直,张亚杰,王蔚.pH 响应多功能封堵剂介孔硅纳米药物靶向递送系统的构建:中国化学会第 19 届反应性高分子学术研讨会论文摘要集[C].2018;199.
- [7] 张悦.新型负载碳点的大孔有机硅纳米药物载体的制备与研究[D].长春:吉林大学,2021.
- [8] 王月桐,黄馨仪,杨柳,等.缓解 EGFR-TKI 耐药的协同作用的氧化还原介孔硅纳米药物:中国化学会学术年会[C].2016.
- [9] 鹿莉莉.高载药量的双响应型中空介孔有机硅纳米药物控释系统的研究[D].武汉:华中师范大学,2016.
- [10] 林青,黄琳,肖晓丽,等.丹参水提液中丹酚酸 B 湿热降解动力学研究[J].中国现代中药,2008,(8):29-31.
- [11] 刘金书.药用植物忽地笑中原儿茶醛合成酶的挖掘与功能鉴定研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2024.

(下转第 123 页)

- rides from *Polygonatum cyrtoneura* [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 88: 104866.
- [12] Zhu S, Liu P, Wu W, *et al.* Multi-constituents variation in medicinal crops processing: Investigation of nine cycles of steam-sun drying as the processing method for the rhizome of *Polygonatum cyrtoneura* [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2022, 209: 114497.
- [13] 夏提古丽·塔西买买提, 赵媛, 刘艺, 等. 熵权法-层次分析法结合 Box-Behnken 响应面法优化雪莲益肾方的提取工艺 [J]. *中国药房*, 2023, 34(15): 1858-1862.
- [14] 王君怡, 郑敏, 何国华, 等. 层次分析法-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化加味桔梗汤水提醇沉工艺 [J]. *上海中医药杂志*, 2026, 60(3): 71-80, 87.
- [15] 钱宇航, 叶喜德, 冯小龙, 等. 层次分析法-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化姜炭炮制工艺 [J]. *药学前沿*, 2025, 29(11): 1838-1845.
- [16] 赵艳丽, 苏锁财, 李婧媛, 等. AHP-EWM 结合 Box-Behnken 响应面法优化重楼-三七药对的提取工艺 [J]. *中药材*, 2025, 48(8): 2037-2043.
- [17] 廖香莲, 吴新, 陈志元, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化蒲公英多成分提取工艺 [J]. *药物评价研究*, 2026, 49(1): 191-201.
- [18] 石双慧, 王梦琳, 魏晓彤, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选黄精酒制工艺及其炮制前后药效对比研究 [J]. *中草药*, 2023, 54(14): 4467-4480.
- [19] 李冬玉, 翟小婷, 陈家全. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化牛耳枫中黄酮和酚酸类化合物的提取工艺及抗氧化活性研究 [J]. *中药材*, 2026, (1): 165-172.
- [20] 钱舒琪, 宋信莉, 龙韦, 等. 响应面法优化黄精多糖超声提取工艺及含量测定 [J]. *贵州科学*, 2025, 43(3): 40-45, 96.
- [21] 戴万生, 毕露露, 邱斌, 等. 黄精总皂苷的提取和含量测定方法研究 [J]. *云南中医中药杂志*, 2023, 44(2): 73-76.
- [22] 韦国兰, 吴超群, 胡秀虹, 等. 黄精总黄酮的提取工艺优化及抗氧化研究 [J]. *广州化工*, 2023, 51(13): 127-130.
- [23] 王佳琪. 林下滇黄精黄酮提取分离、纯化及抗氧化活性研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [24] 韦国兰, 龙杰凤, 王翔, 等. 黄精浸膏的制备工艺及有效成分的测定 [J]. *凯里学院学报*, 2025, 43(3): 1-8.
- [25] 黄金月, 崔美岩, 郑时嘉, 等. 响应面优化黄精根茎总皂苷、总黄酮提取方法及其在不同产地黄精成分含量比较中的应用 [J]. *中医药学报*, 2021, 49(9): 56-61.
- [26] 邓庆庆, 王小平, 王亚丽. 层次分析-熵权复合权重法结合 Box-Behnken 响应面优化疏筋解毒方的提取工艺 [J]. *华西药学报*, 2026, 41(1): 55-61. ■

(上接第 115 页)

- [12] 张景富, 肖雨, 何继江, 等. 原儿茶醛对环磷酸腺苷诱导急性肾损伤的保护作用及机制研究 [J]. *药物评价研究*, 2024, 47(6): 1217-1223.
- [13] Liberman A, Mendez N, Trogler C W, *et al.* Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine [J]. *Surface Science Reports*, 2014, 69(2/3): 132-158.
- [14] 杨世瑜, 肖雨, 安春娜, 等. 原儿茶醛的神经保护作用机制研究进展 [J]. *中草药*, 2024, 55(7): 2463-2471.
- [15] 丁伟宏. 多孔纳米复合材料的构筑及其对蛋白质结合毒素吸附清除性能的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [16] Yang P, Gai S, Lin J. Functionalized mesoporous silica materials for controlled drug delivery [J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(9): 3679-3698.
- [17] Mao X, Chen K, Zhao Y, *et al.* Bioinspired surface functionalization of biodegradable mesoporous silica nanoparticles for enhanced lubrication and drug release [J]. *Friction*, 2022, 11(7): 1194-1211.
- [18] Xu H J, Wang W, Lee J, *et al.* A type of phenolic compound, hydroxyacetophenone: Tyrosinase inhibition mechanism evaluation by application of biochemical assay and computational molecular dynamics [J]. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics*, 2025, 44(3): 11-13.
- [19] 曾静, 孟令奎, 杨旸, 等. 微型核磁共振波谱仪在药物化学实验教学中的应用 [J]. *药学教育*, 2025, 41(3): 91-95.
- [20] 封海波, 杜夕辉, 黄玲, 等. 介孔二氧化硅纳米颗粒在生物材料的应用研究进展 [J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(1): 26-33.
- [21] Bianca D, Verónica C, María V, *et al.* Natural biopolymers as smart coating materials of mesoporous silica nanoparticles for drug delivery [J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(2): 447.
- [22] Tiburcius S, Krishnan K, Patel V, *et al.* Triple surfactant assisted synthesis of novel core-shell mesoporous silica nanoparticles with high surface area for drug delivery for prostate cancer: Article for masterpiece materials with functional excellence [J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 2022, 95(2): 331-340.
- [23] Croissant G J, Zhang D, Alsaiari S, *et al.* Protein-gold clusters-capped mesoporous silica nanoparticles for high drug loading, autonomous gemcitabine/doxorubicin co-delivery, and in-vivo tumor imaging [J]. *Journal of Controlled Release*, 2016, 229: 183-191.
- [24] Khalbas H A, Albayati M T, Ali S N, *et al.* Drug loading methods and kinetic release models using of mesoporous silica nanoparticles as a drug delivery system: A review [J]. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2024, 50: 261-280. ■