

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.06.004

辣椒素微胶囊的理化性质及体外释药特性

胡艳,冯盈盈,付小巧

(贵阳学院 食品科学与工程学院,贵州 贵阳 550005)

摘要: 辣椒素作为天然生物活性物质因强烈的辛辣味限制其开发和应用,制备具有缓释效果的微胶囊可拓宽辣椒素的应用。以羧甲基纤维素钠和明胶为壁材,辣椒素为芯材,通过复合凝聚法制备辣椒素微胶囊,并利用激光粒度仪、紫外-可见分光光度计、扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)仪、差示扫描量热(differential scanning calorimeter, DSC)仪等手段对辣椒素微胶囊的理化性质进行表征。此外,通过体外模拟释放研究辣椒素微胶囊在模拟胃、肠液中辣椒素的缓释效果,并对其释放动力学特征进行评价。结果表明,辣椒素微胶囊为白色固体粉末,平均粒径为40.81 μm ,微观结构呈形态不均一的片状或棒状;微胶囊包埋率和载药量分别为87.3%和43.1%;FTIR结果表明,辣椒素被完全包埋在微胶囊内部且未与壁材发生化学反应;DSC分析结果表明,微胶囊包埋明显提高辣椒素的热稳定性。体外模拟释药结果显示,微胶囊在模拟胃液中释放较少,7 h累计释放率32.5%,而在模拟肠液中累计释放率达到80%左右,具有良好的控释效果,释放动力学模型为Retger-peppas方程。

关键词: 辣椒素;微胶囊;复凝聚法;体外释放;理化性质

Physicochemical Properties of Capsaicin Microcapsules and *in vitro* Drug Release Characteristics

HU Yan, FENG Yingying, FU Xiaoqiao

(School of Food Science and Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, Guizhou, China)

Abstract: As a natural bioactive substance, capsaicin faces obstacles in its development and application due to its strong spicy taste, and the preparation of microcapsules with a slow-release effect can broaden the application of capsaicin. With the carboxyl methyl cellulose sodium and gelatin as wall materials and capsaicin as core material, capsaicin microcapsules were prepared through a complex coacervation method. In addition, the laser particle size meter, ultraviolet-visible spectrophotometer, scanning electron microscope (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and differential scanning calorimeter (DSC) were used to characterize the physicochemical properties of capsaicin microcapsules. Furthermore, the slow-release effect of capsaicin microcapsules in simulated gastrointestinal fluid was investigated by *in vitro* simulated release, and the release kinetic characteristics were evaluated. The results showed that capsaicin microcapsules contained white solid powder with an average particle size of 40.81 μm , and the microstructure was a heterogeneous sheet or rod; the encapsulation rate and drug load of microcapsules were 87.3% and 43.1%, respectively. The FTIR results showed that capsaicin was completely encapsulated in the microcapsule and did not react with the wall materials. The DSC analysis showed that the thermal stability of capsaicin was significantly improved by microcapsule encapsulation. The *in vitro* simulated release results showed that the microcapsules were released less in the simulated gastric juice, and the cumulative release rate of 7 h was 32.5%, while the cumulative release rate in the simulated intestinal fluid reached about 80%, indicating good controlled release effect, and the release kinetic model was the Retger-peppas equation.

Key words: capsaicin; microcapsules; composite coacervation; *in vitro* release; physicochemical properties

引文格式:

胡艳,冯盈盈,付小巧.辣椒素微胶囊的理化性质及体外释药特性[J].食品研究与开发,2025,46(6):25-30.

HU Yan, FENG Yingying, FU Xiaoqiao. Physicochemical Properties of Capsaicin Microcapsules and *in vitro* Drug Release Characteristics[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 25-30.

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合平台人才-CXTD[2022]002);贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2022]006);贵阳学院研究生科研基金项目(2023-YJS02);贵阳学院引进人才启动资金科研项目

作者简介:胡艳(1991—),女(汉),副教授,博士,研究方向:食品胶体营养学、农产品精深加工。

辣椒素(capsaicin)是辣椒果实中主要辛辣成分,具有抑菌、抗氧化、镇痛、降血糖等多种生物活性^[1-2],但辣椒素属于热不稳定性的酰胺类化合物,易挥发且有强烈刺激性气味,从而限制了其在食品领域中的应用^[3]。微胶囊具有制备工艺简单、保护敏感成分、降低挥发性和可控释放等优点,在食品加工领域被广泛应用^[4-5]。仲博^[6]采用两步法制备辣椒素海藻酸钙微胶囊并研究了制备因素对辣椒素释放的影响,但该微胶囊对温度和光照敏感,且在模拟肠道消化液中的释放效果不理想。薛露等^[7]将高压均质与喷雾干燥法相结合,以明胶为壁材包埋 β -胡萝卜素可显著增强微胶囊的热稳定性,但单一的壁材难以维持微胶囊的贮藏稳定性。明胶和阿拉伯胶是复合凝聚体系中应用最广泛的壁材组合^[8-10],其中阿拉伯胶价格高且品质不稳定,羧甲基纤维素钠(carboxymethyl cellulose sodium, CMC)价格低廉、来源广、电负性强,作为壁材替代阿拉伯胶可显著降低制备微胶囊的成本^[11]。此外,由于形成的复合凝聚微胶囊所需CMC少,从而囊壁中明胶含量相对较高,使得明胶/CMC形成的囊壁具有易于硬化和凝胶化的优势。

本研究利用明胶/CMC为复合壁材,通过复合凝聚法制备辣椒素-明胶/CMC微胶囊(capsaicin-gelatin/CMC microsphere, CGCM),在探究CGCM理化性质的基础上进一步考察其体外释药机制,以期对辣椒素微胶囊的制备和应用提供一定的理论支撑和技术借鉴。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

辣椒素标准品(纯度为97%):上海麦克林生化科技有限公司;磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、明胶(均为生化试剂):成都金山化学试剂有限公司;羧甲基纤维素钠(分析纯):天津市永大化学试剂有限公司;谷氨酰胺转氨酶(1 000 U/g):北京索莱宝科技有限公司;氢氧化钠(分析纯):四川西陇科学有限公司;盐酸、无水乙醚(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器、FA2204电子分析天平:上海力辰邦西仪器科技有限公司;S4210 pH计:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;SHZ-D(Ⅲ)循环水式多用真空泵:河南省予华仪器有限公司;SHS-C数显恒温振荡器:金坛区白塔安瑞实验仪器厂;800-1离心机:常州荣华仪器制造有限公司;SCIENTZ-18N钟罩式冷冻干燥机:宁波新芝生物科技股份有限公司;DSC 4000差示扫描量热仪、Spectrum Two傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)仪:美国PerkinElmer公司;YQY-12氧气减压器:上海希星减压器制造有限公司;WGL-125B电热

鼓风干燥箱:天津市泰斯特仪器有限公司;SCF-105-B激光粒度分析仪:珠海欧美克仪器有限公司;RE-2000B旋转蒸发器:上海亚荣生化仪器厂;722G紫外-可见分光光度计:上海仪电仪器分析有限公司;S-4800扫描电子显微镜:日本日立公司。

1.3 试验方法

1.3.1 辣椒素-明胶/CMC微胶囊(CGCM)的制备

参照高艳^[12]优化的条件制备CGCM,稍作修改。称取适量的明胶/CMC按质量比9:1溶于蒸馏水,形成质量浓度为1%的溶液,在40℃水浴中磁力搅拌至充分溶解,冷却至室温备用。按照芯材与壁材质量比1:1称取适量辣椒素加入明胶/CMC壁材溶液中,通过高速剪切(12 000 r/min, 2 min)进行乳化均质,随后将乳状液快速倒入直三口烧瓶中,并用体积分数为20%的冰醋酸溶液调节乳状液pH值至4.6,置于40℃恒温水浴锅中持续搅拌(400 r/min)30 min,使CMC与明胶充分聚合。采用冰浴使乳状液温度降至15℃以下,然后用质量分数10%的NaOH溶液调节至中性。按25 U/g明胶的比例加入固化剂谷氨酰胺转氨酶(transglutaminase, TGase)^[13],室温下低速持续搅拌4 h,使聚合产生的微胶囊充分固化。固化后静置10 h,抽滤、蒸馏水洗涤即得湿的CGCM,真空冷冻干燥后得CGCM粉末。

1.3.2 模拟胃肠液的制备

1.3.2.1 模拟胃液(simulated gastric fluid, SGF)的配制

取磷酸二氢钾100 g,加水800 mL,用盐酸调节pH值至2.5,用水定容至1 000 mL,摇匀,即得模拟胃液。将配制好的模拟胃液置于4℃的冰箱中保存备用。

1.3.2.2 模拟肠液(simulated intestinal fluid, SIF)的配制

取0.2 mol/L磷酸二氢钾溶液250 mL,加0.2 mol/L氢氧化钠溶液118 mL,加水定容至1 000 mL,摇匀,即得模拟肠液。配制好的模拟肠液置于4℃的冰箱中保存备用。

1.3.3 CGCM理化性质测定

1.3.3.1 微观形态观察

采用扫描电子显微镜观察CGCM微观结构。取少量CGCM粉末均匀置于样品台,进行喷金处理后将样品台固定于载物台,在加速电压10 kV、放大倍数1 000的条件下进行观测。

1.3.3.2 粒径分布测定

通过激光粒度分析仪测定CGCM的粒径分布。参照文献^[14]所述方法,测量材料折光率为1.508,水分散剂折射率为1.33,吸收率为0.1,重复测定3次。

1.3.3.3 辣椒素标准曲线的绘制

称取25 mg辣椒素标准品于烧杯中,用无水乙醇溶解并转移至50 mL容量瓶中定容,即得500 mg/L的辣椒素母液。分别吸取0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL辣椒素母液于10 mL的容量瓶中,加入无水乙醇定容至刻

度,摇匀。以无水乙醇为空白对照,采用紫外-可见分光光度计在 280 nm 波长下测定吸光度($A_{280\text{nm}}$),每组测定 3 次。辣椒素溶液浓度($C, \mu\text{g/mL}$)范围为 20~70 $\mu\text{g/mL}$,得到回归方程: $A_{280\text{nm}}=0.0106C+0.019$, $R^2=0.9997$ 。

1.3.3.4 载药量和包埋率的测定

精确称取 0.500 0 g 的湿 CGCM(M, g)于 50 mL 锥形瓶中,加入 20 mL 无水乙醇,在 37 °C 水浴振荡提取 30 min,采用无水 Na_2SO_4 去除提取液中水分,4 000 r/min 离心 15 min,取上清液稀释定容,用紫外-可见分光光度计测定吸光度,根据标准曲线方程计算 CGCM 中辣椒素总含量($M_1, \mu\text{g}$)。

精确称取 0.500 0 g 湿 CGCM(M, g)于 50 mL 锥形瓶中,加入 20 mL 无水乙醚,37 °C 水浴振荡提取 20 min,4 000 r/min 离心 15 min,收集上清液,加入少量无水 Na_2SO_4 去除滤液中水分,过滤弃去固形物,采用旋转蒸发器将滤液旋蒸至近干,然后采用无水乙醇溶解样品并稀释至适当浓度,采用分光光度法测定辣椒素含量,结合标准曲线方程计算 CGCM 表面辣椒素含量($M_s, \mu\text{g}$)。CGCM 的包埋率($E, \%$)和载药量($L_E, \%$)计算公式如下。

$$E = \left(1 - \frac{M_s}{M_1}\right) \times 100$$

$$L_E = \frac{M_1}{M} \times 100$$

1.3.3.5 FTIR 分析

分别称取 100 mg 充分研磨后的辣椒素、明胶/CMC 复合壁材、CGCM 粉末,利用 FTIR 对其进行官能团特征分析,参照谭睿等^[15]的研究方法并略有改动。红外分析扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} ,扫描次数为 32 次,分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.3.3.6 差示扫描量热(differential scanning calorimetry, DSC)分析

参照王锦成等^[16]的方法并稍作改动,将待测样品充分研磨后,称取 5~6 mg 于坩埚中,进行热稳定性分析,程序设置为温度从 30 °C 以 10 °C/min 的速度升温至 400 °C,氮气流速为 100 mL/min。

1.3.4 CGCM 体外释放试验

CGCM 中辣椒素的释放参考党蓓蕾等^[17]的方法并稍作修改。分别称取 2 份 0.500 0 g 的 CGCM 于 250 mL 磨口锥形瓶中,再分别加入 50 mL pH1.5(KCl-HCl 溶液)、pH7.4(磷酸二氢钾-磷酸氢二钾溶液)的缓冲溶液^[18],将锥形瓶置于恒温振荡器(30 °C, 100 r/min)水浴孵育,分别于 0.5、1、2、3、4、5、6、7 h 时取样 1 mL 并补加相同等量空白缓冲液。将 1 mL 样液离心(12 000 r/min, 10 min)后用相应释放介质稀释至 10 mL,用紫外-可见分光光度计在 280 nm 下测吸光度,分析辣椒素含量并

计算其累计释放率($Q, \%$),计算公式如下。

$$Q = [(A_n + \dots + A_2 + A_1) \times V_1] / A \times V_2 \times 100$$

式中: $A_1 \sim A_n$ 为各时间点取样药物量,mg/mL; V_1 为各时间点固定取样体积,mL; A 为药物总量,mg/mL; V_2 为溶出介质总体积,mL。

1.3.5 CGCM 释放特性数据拟合模型的建立

采用表 1 不同的动力学模型分别对 CGCM 在模拟胃液和模拟肠液中的释放数据进行拟合,得出 CGCM 在模拟胃液和模拟肠液中的释放动力学方程。

表 1 释放动力学模型

Table 1 Release kinetics model

| 名称 | 公式 |
|---------------------|-----------------------------|
| Retger-peppas 方程 | $Q=K \times t^n$ |
| Higuchi 平面扩散方程 | $Q=K \times t^{0.5}$ |
| Hixson-Crowell 溶蚀方程 | $(100-Q)^{1/3}=-K \times t$ |
| 零级动力学方程 | $Q=K \times t$ |
| 一级动力学方程 | $\ln(1-Q)=-K \times t$ |
| Weibull 分布方程 | $Q=1-(K \times e^{-t}-e^n)$ |

注: Q 为辣椒素累计释放率,%; t 为释放时间,min; K 为常数; n 为释放机理参数。

1.4 数据分析

所有试验重复 3 次,采用 IBM SPSS Statistics 19 软件对试验数据进行差异显著性分析($p < 0.05$),采用 Origin 9.0 作图。

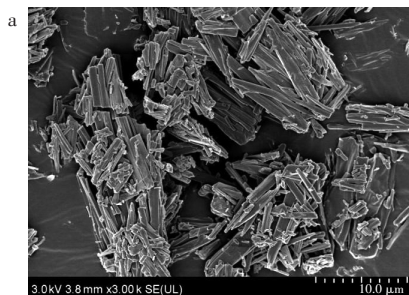
2 结果与分析

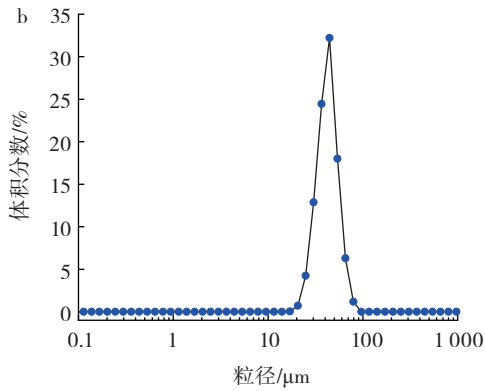
2.1 CGCM 的微观结构及粒径分布

CGCM 的微观结构和粒径分布如图 1 所示。

由图 1a 可知,CGCM 表面呈现大小不均的片状化、棒状结构,极少部分呈不规则球状结构。这一结果与 Guo 等^[19]姜黄素微胶囊的研究结果一致。这是因为真空冷冻干燥条件下,乳状液在预冻过程中会形成冰晶体,从而破坏原有结构,在分子间作用力的驱动下导致溶质更容易聚合,因而包载辣椒素的 CGCM 呈现大片层结构。

微胶囊的粒径和分布状态是决定微胶囊产品品质的重要参数,微胶囊的粒径越小,其包埋物越容易释放^[20]。由图 1b 可知,粒径分布范围在 30~60 μm ,呈单





a. 扫描电子显微镜图; b. 粒径分布。

图1 CGCM的扫描电子显微镜图和粒径分布

Fig.1 SEM images and particle size distribution of CGCM

峰分布,分散性较好。CGCM的平均粒径为40.81 μm,与秦庆雨等^[14]利用辣椒叶蛋白冷冻干燥制备的辣椒素微胶囊(平均粒径97.6 μm)相比,粒径更小。这可能是由于明胶与CMC的复合凝聚作用形成结构更加紧密的棒状复合物,导致平均粒径降低。

2.2 CGCM的包埋率和载药量

CGCM的包埋率和载药量代表了明胶/CMC对辣椒素的包埋效果,其结果如图2所示。

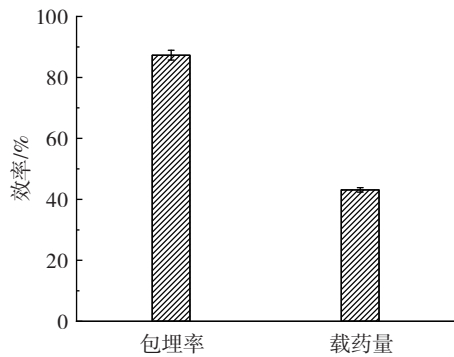


图2 辣椒素微胶囊的包埋率及载药量

Fig.2 Encapsulation and loading rate of capsaicin microcapsules

由图2可知,CGCM的包埋率高达87.3%,载药量为43.1%,且CGCM表面辣椒素含量较低(3.2%),表明辣椒素很好地被包裹在壁材内部。这是由于在乳化均质过程中,辣椒素被明胶/CMC形成的聚合物充分包裹,故辣椒素包埋率较高。而在真空冷冻干燥过程中,预冷冻易使乳液内部水分形成冰晶,从而破坏均质过程中乳液在芯材外层形成的液态膜,且随干燥进行,冰晶不断升华,表面结构遭到破坏致使局部芯材暴露,因而有部分辣椒素迁移到微胶囊表面^[21]。

2.3 辣椒素微胶囊 FTIR 分析

辣椒素、空白微胶囊(gelatin/CMC microsphere, GCM)和CGCM的FTIR光谱如图3所示。

由图3可知,辣椒素粉末的FTIR谱图中,在3290 cm⁻¹处出现的尖峰是辣椒素的特征峰,为—NH

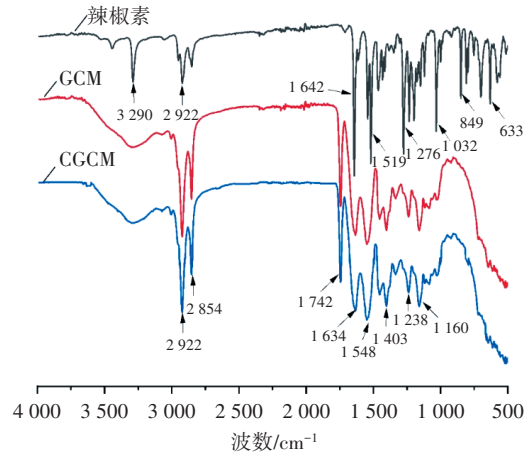


图3 FTIR分析

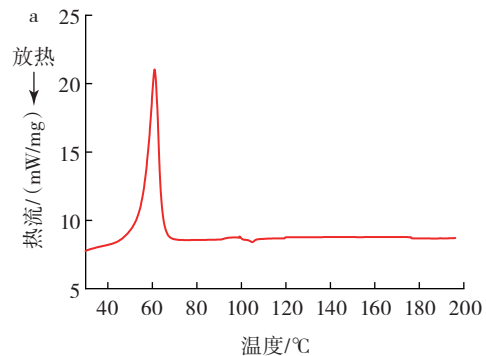
Fig.3 FTIR analysis

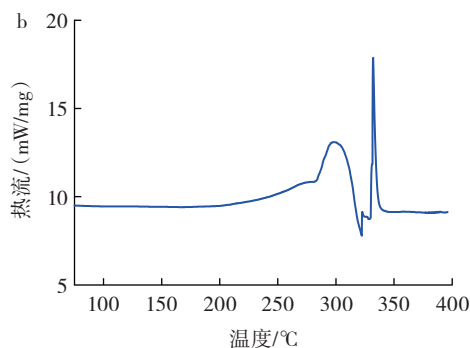
键的伸缩振动,在1642 cm⁻¹的峰可能是由酰胺I带(CO—NH)中C=O的伸缩振动所致,1519 cm⁻¹和1032 cm⁻¹分别为C=C和C—O—C的伸缩振动峰。GCM和CGCM的红外光谱基本相同,在波数为2922、2854、1742、1634、1548、1160 cm⁻¹等处有较为明显的吸收峰,其中2922 cm⁻¹为CMC与明胶复合壁材中O—H的伸缩振动分峰,1634 cm⁻¹是C=O的伸缩振动峰,1160 cm⁻¹是R—O—R'的伸缩振动峰^[22]。微胶囊负载辣椒素后,其红外光谱与GCM基本相同且未产生新的特征峰,表明复合壁材已经成功将辣椒素包埋在内部。但是,GCM和CGCM在辣椒素的特征吸收波段(1000~1250 cm⁻¹)也出现了微弱的锯齿状峰,由此可以初步判定,辣椒素被包埋到明胶/CMC复合壁材过程中未与壁材发生化学反应,故辣椒素被包埋后其特征吸收峰因受到一定的掩蔽而减弱。

2.4 辣椒素微胶囊 DSC 分析

辣椒素和CGCM的DSC分析如图4所示。

本次试验所用辣椒素的纯度为97%,物质中所含杂质越多,熔点偏差越大。查阅资料可知辣椒素的熔融温度为60.20℃,壁材明胶的熔融温度为32.50℃,壁材羧甲基纤维素钠熔点为274.00℃。明胶的热稳定性低于辣椒素,可保证应用过程中辣椒素的成功释放。由图4可知,试验所用合成辣椒素的熔融温度为60.96℃,辣





a. 辣椒素; b. CGCM。

图4 辣椒素及CGCM的差示扫描量热图

Fig.4 Differential scanning calorigrams of capsaicin and CGCM

椒素微胶囊的熔融温度上升到了331.97℃。由此可知,在固化剂谷氨酰胺转胺酶的作用下,芯材与壁材紧密包裹,使得微胶的熔融温度得到了极大的提升。

2.5 辣椒素微胶囊体外模拟释药特性分析

CGCM在模拟胃液和模拟肠液中释放情况如图5所示。

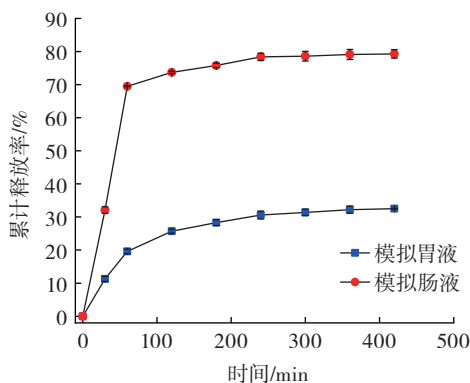


图5 微胶囊在模拟胃液和模拟肠液中释放曲线

Fig.5 Release curves of microcapsules in simulated gastric juice and intestinal fluid

由图5可知,CGCM在模拟胃液中释放缓慢,60 min内辣椒素累计释放率小于20%,420 min辣椒素累计释放率为32.5%。CGCM在模拟肠液中60 min内迅速释放,随后趋于平缓,60 min时辣椒素累计释放率达69.5%,420 min辣椒素累计释放率达到80%左右。这一结果表明本研究所制备的CGCM具有良好的肠液选择释放能力。这可能是因为在模拟胃液酸性环境中明胶和CMC之间的静电相互作用维持CGCM的结构,从而辣椒素的释放量较少。然而,模拟肠液的pH值趋于中性,明胶带更多负电荷导致明胶/CMC的静电相互作用被破坏,微胶囊的壁材崩解,从而导致辣椒素在60 min内迅速释放^[23]。

将CGCM在模拟胃液及模拟肠液环境中的累计释放率与6种释放动力学方程进行拟合,拟合方程结果如表2所示。

表2 CGCM体外释放动力学模型模拟结果及参数

Table 2 Simulation results and parameters of CGCM release kinetics model *in vitro*

| 名称 | 释放介质 | 方程结果 | R ² |
|---------------------|------|--|----------------|
| Retger-peppas 方程 | SGF | $Q=5.226t^{0.313}$ | 0.969 |
| | SIF | $Q=24.850t^{0.204}$ | 0.906 |
| Higuchi 平面扩散方程 | SGF | $Q=1.854t^{0.5}$ | 0.888 |
| | SIF | $Q=4.819t^{0.5}$ | 0.648 |
| Hixson-Crowell 溶蚀方程 | SGF | $Q=100+(-0.011t)^3$ | -36.703 |
| | SIF | $Q=100+(-0.007t)^3$ | -1.739 |
| 零级动力学方程 | SGF | $Q=0.064t+11.378$ | 0.724 |
| | SIF | $Q=0.134t+37.438$ | 0.519 |
| 一级动力学方程 | SGF | $Q=1-e^{-8.752t}$ | -4.498 |
| | SIF | $Q=1-e^{-1.186t}$ | -5.525 |
| Weibull 分布方程 | SGF | $Q=1-(26.450 \times e^{-t} - e^{-3.237t})$ | 0.613 |
| | SIF | $Q=1-(70.813 \times e^{-t} - e^{-4.246t})$ | 0.713 |

注:由于Hixson-Crowell溶蚀方程和一级动力学方程未能有效描述药物释放行为,其拟合的决定系数(R²)出现负值。

由表2可知,CGCM在SGF和SIF中最佳的释放动力学模型均为Retger-peppas方程,拟合方程分别为 $Q=5226t^{0.313}$, $R^2=0.969$; $Q=24.850t^{0.204}$, $R^2=0.906$ 。CGCM在SGF和SIF中释放动力学方程中n值均小于0.5,分别为0.313和0.204,表明辣椒素的释放属于Fickian扩散^[24]。对比Retger-peppas方程的释放速率常数K发现,SIF比SGF的释放速率常数大,表明辣椒素在SIF中释放速度更快,这与释放曲线结果一致。

3 结论

本研究以明胶和CMC作为复合壁材,辣椒素为芯材,采用复合凝聚法制备辣椒素微胶囊(CGCM)。CGCM的包埋率为87.3%,载药量为43.1%,平均粒径为40.81 μm。经冷冻干燥后微胶囊外观为白色固体粉末,微观结构呈形状不一的片状化、棒状结构。FTIR分析结果表明,辣椒素可被明胶/CMC复合壁材有效包埋,且壁材与芯材之间不发生化学反应,保障了辣椒素结构的天然性与完整性。CGCM具有良好的热稳定性,其熔融温度为331.97℃,有利于常温贮藏和使用。体外模拟释放结果表明,使用明胶/CMC作微胶囊的壁材可有效控制辣椒素在胃液中的释放并在肠液中大量释放,具有良好的缓释性及肠靶向释放性,有利于提高人体对辣椒素的利用率。喷雾干燥法可形成较为规整、粒径分布较窄的微胶囊,包埋率较高,但工艺较为复杂;分子包埋法利用主体分子的空腔结构制备的微胶囊对环境因素更敏感,而复合凝聚法制备的微胶囊更稳定。复合凝胶法对壁材的选择有一定限制,需要合适的带相反电荷的高分子组合,且成本较高。

未来可寻找更多性能优良、来源广泛、成本低廉的壁材,以提高复合凝聚法的适用性和经济性。

参考文献:

- [1] 岳雨霞. 辣椒提取物的工艺条件优化标准及其抑菌活性研究[J]. 中国标准化, 2017(12): 44-45.
YUE Yuxia. Study on optimization standard of process conditions and antibacterial activity of capsicum extract[J]. Chinese standardization, 2017(12): 44-45.
- [2] 狄云, 蒋健箴, 石正强. 辣椒果实中的辣椒素类物质研究进展[J]. 食品科学, 1999, 20(6): 30-32.
DI Yun, JIANG Jianzhen, SHI Zhengqiang. Research progress of capsaicinoids in pepper fruits[J]. Food Science, 1999, 20(6): 30-32.
- [3] SU X C, YANG Z, TAN K B, et al. Preparation and characterization of ethyl cellulose film modified with capsaicin[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116259.
- [4] WANG W H, HAO X P, CHEN S G, et al. pH-Responsive capsaicin@chitosan nanocapsules for antibiofouling in marine applications[J]. Polymer, 2018, 158: 223-230.
- [5] POLEKKAD A, FRANKLIN M E E, PUSHPADASS H A, et al. Microencapsulation of zinc by spray-drying: Characterisation and fortification[J]. Powder Technology, 2021, 381: 1-16.
- [6] 仲博. 辣椒碱肠溶微囊的制备及其特性考察[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2011.
ZHONG Bo. Preparation and characterization of capsaicin enteric-coated microcapsules[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2011.
- [7] 薛露, 彭珍, 关倩倩, 等. β -胡萝卜素包埋产品的制备与性能分析[J]. 饮料工业, 2020, 23(2): 26-31.
XUE Lu, PENG Zhen, GUAN Qianqian, et al. Preparation and characterization analysis of β -carotene-embedded products[J]. Beverage Industry, 2020, 23(2): 26-31.
- [8] 李芳, 王全杰, 侯立杰. 明胶微胶囊的应用现状与发展趋势[J]. 中国皮革, 2011, 40(1): 43-46, 54.
LI Fang, WANG Quanjie, HOU Lijie. Application and development of gelatin microcapsule[J]. China Leather, 2011, 40(1): 43-46, 54.
- [9] ANVARI M, PAN C H, YOON W B, et al. Characterization of fish gelatin-gum Arabic complex coacervates as influenced by phase separation temperature[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 79: 894-902.
- [10] LV Y, ZHANG X M, ABBAS S, et al. Simplified optimization for microcapsule preparation by complex coacervation based on the correlation between coacervates and the corresponding microcapsule[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 225-233.
- [11] 张海洋. 明胶/CMC 复合凝聚微胶囊及新型固化剂研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
ZHANG Haiyang. Study on gelatin/CMC composite condensed microcapsules and new curing agent[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [12] 高艳. 复合凝聚法制备辣椒素微胶囊的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
GAO Yan. Preparation of capsaicin microcapsules by complex coagulation method[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [13] 董志俭. 复合凝聚薄荷油微胶囊的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
DONG Zhijian. Study on compound coagulated peppermint oil microcapsules[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [14] 秦庆雨, 李宇宇, 李文虎, 等. 不同干燥方式下叶蛋白-辣椒素微胶囊理化特性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 378-385.
QIN Qingyu, LI Yuyu, LI Wenhui, et al. Effects of different drying methods on properties of leaf protein-capsaicin microcapsules[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 378-385.
- [15] 谭睿, 申瑾, 董文江, 等. 复合凝聚法制备绿咖啡油微胶囊及其性能[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 144-152.
TAN Rui, SHEN Jin, DONG Wenjiang, et al. Preparation of green coffee oil microcapsules by complex coacervation method and its physicochemical properties[J]. Food Science, 2020, 41(23): 144-152.
- [16] 王锦成, 陈思浩, 徐子成, 等. 聚乳酸-辣椒素微胶囊的制备及性能[J]. 农药, 2011, 50(9): 646-648.
WANG Jincheng, CHEN Sihao, XU Zicheng, et al. Preparation and properties research on the microcapsules of PLA coated capsaicin[J]. Agrochemicals, 2011, 50(9): 646-648.
- [17] 党蓓蕾, 颜庭轩, 程月, 等. 卡马西平微胶囊的超临界制备及溶出性能研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 833-838.
DANG Beilei, YAN Tingxuan, CHENG Yue, et al. Supercritical preparation and dissolution property of carbamazepine microcapsule[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2014, 38(6): 833-838.
- [18] 何晋浙, 姚丽娜, 孙培龙. 响应面法优化猴头菌素-PLGA 微球制备工艺及其体外释药性能[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 242-247.
HE Jinzhe, YAO Lina, SUN Peilong. Optimized preparation and *in vitro* release properties of erinacines-PLGA microspheres by response surface methodology[J]. Food Science, 2017, 38(6): 242-247.
- [19] GUO J Y, LI P L, KONG L Y, et al. Microencapsulation of curcumin by spray drying and freeze drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 109892.
- [20] FERREIRA NOGUEIRA G, MATTA FAKHOURI F, DE OLIVEIRA R A. Incorporation of spray dried and freeze dried blackberry particles in edible films: Morphology, stability to pH, sterilization and biodegradation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 20: 100313.
- [21] EL-MESSERY T M, ALTUNTAS U, ALTIN G, et al. The effect of spray-drying and freeze-drying on encapsulation efficiency, *in vitro* bioaccessibility and oxidative stability of krill oil nanoemulsion system[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105890.
- [22] ZHAO J Y, WEI F, XU W L, et al. Enhanced antibacterial performance of gelatin/chitosan film containing capsaicin loaded MOFs for food packaging[J]. Applied Surface Science, 2020, 510: 145418.
- [23] DEVI N, MAJI T K. Preparation and evaluation of gelatin/sodium carboxymethyl cellulose polyelectrolyte complex microparticles for controlled delivery of isoniazid[J]. AAPS PharmSciTech, 2009, 10(4): 1412-1419.
- [24] SHI J, SHI J, FENG D S, et al. Stimuli-responsive hybrid composites based on CaCO₃ microparticles and smart polyelectrolytes for controllable drug delivery[J]. Polymer Bulletin, 2014, 71(7): 1857-1873.