甜玉米芯多糖纳米乳微胶囊制备及释放

王鑫[1,2]，史昕鸿[1,2]，罗钰[1,2]，修伟业[1,2]，周卓[1,2]，王景阳[1,2]，马永强[1,2*]
（1.哈尔滨商业大学 食品工程学院，哈尔滨 150028；
2.黑龙江省谷物食品与谷物资源重点实验室，哈尔滨 150028）

摘要：目的 改善甜玉米芯多糖（SCP）大分子特性以及稳定性，促进 SCP 的肠道吸收。**方法** 将 SCP 水溶液制备成油包水型（W/O）甜玉米芯多糖纳米乳液（SCP-NE），以复合蛋白为壁材制备成 SCP-NE 微胶囊，采用单因素试验、Box-Behnken 设计和响应面法优化 SCP-NE 微胶囊制备工艺，以粒径分析、红外光谱分析、热重分析，对 SCP-NE 微胶囊物化性质进行研究，并进行体外模拟胃肠液释放研究。**结果** 制备 SCP-NE 微胶囊最佳条件为麦芽糊精（MD）与大豆分离蛋白（SPI）的质量比为 2∶3、芯壁比为 1∶2、总体固形物含量为 20%，此时包封率达到（87.6±1.3）%。体外模拟胃肠液释放结果表明，SCP-NE 微胶囊在 2 h 的胃液消化中释放率为 8.83%，在模拟肠液中 1 h 的释放量为 62.87%。**结论** 以 MD 和 SPI 作为壁材制备的 SCP-NE 微胶囊在胃肠液释放中具有良好的缓释性能。

关键词：甜玉米芯多糖；纳米乳；微胶囊；缓释
中图分类号：TS201.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)11-0128-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.015

Preparation and Release of Sweet Corncob Polysaccharide Nano Emulsion Microcapsules

WANG Xin[1,2], *SHI Xinhong*[1,2], *LUO Yu*[1,2], *XIU Weiye*[1,2], *ZHOU Zhuo*[1,2], *WANG Jingyang*[1,2], *MA Yongqiang*[1,2*]

(1. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;
2. Key Laboratory of Cereal Food and Cereal Resources in Heilongjiang Province, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the macromolecular properties and stability of sweet corncob polysaccharide (SCP) and promote the intestinal absorption of SCP. The aqueous solution of SCP was prepared into water-in-oil (W/O) sweet corncob polysaccharide nano emulsion (SCP-NE), and the composite protein was used as the wall material to prepare SCP-NE microcapsules. Single factor test, Box-Behnken design and response surface method were used to optimize the preparation process of SCP-NE microcapsules. The physical and chemical properties of SCP-NE microcapsules were studied by particle size analysis, infrared spectral analysis, and thermogravimetric analysis, and the release of gastric and intestinal fluid was simulated in vitro. The optimal conditions for preparing SCP-NE microcapsules were mass ratio of maltodextrin (MD) to soy protein isolate (SPI) of 2∶3, core to wall ratio of 1∶2, total solid content of 20%, and encapsulation rate of (87.6±1.3)%. The results of simulated gastric and intestinal fluid release in vitro showed that the release rate of SCP-NE microcapsules was 8.83% in gastric fluid digestion for 2 h, and 62.87% in simulated intestinal fluid for 1 h. SCP-NE microcapsules prepared with MD and SPI as wall materials have good slow-release

收稿日期：2024-04-11
基金项目：哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划项目（2019CX31）；哈尔滨商业大学产业化项目（22CZ16）
*通信作者

performance in gastroenteric fluid release.

KEY WORDS: sweet corn cob polysaccharide; nano emulsion; microcapsule; slow release

多糖是许多单糖由糖苷键连接而成的重要的活性物质[1]，具有免疫调节[2]、抗肿瘤[3]、抗氧化[4]和降血糖[5]等作用，在食品、药物以及保健品等领域得到广泛利用[6]。甜玉米芯是甜玉米的副产物，甜玉米芯多糖具有防治糖尿病、抗氧化、抗肿瘤等功效[7]，目前对其综合研究利用较少，造成生物资源极大浪费[8]。纳米乳液（Nano Emulsion，NE）是在表面活性剂和助表面活性剂的作用下，使得 2 种互不相溶的液体形成外观透明或半透明的分散体系，表现为良好的热力学稳定性以及各向同性[9]。NE 能够有效地将功能成分封装到液滴中，提高包埋药的物稳定性、大分子水溶性药物的生物利用率[10]以及药物缓释作用[11]，使得不稳定的食品功效成分如天然植物多糖[12]、多酚[13]、黄酮类[14]与水相食品体系相结合。甜玉米芯多糖纳米乳液（SCP-NE）能够较好地包埋 SCP，且具有良好的稳定性能，但是研究发现，在模拟胃液的酸性环境中纳米乳结构容易遭到破坏，表现为较低的口服生物利用度[15]。因此将 SCP-NE 包埋，加入壁材制备成微胶囊，以期使 SCP 在肠道更好地释放。麦芽糊精（MD）是一种水解淀粉，具有较好的保湿作用与稳定作用，但其乳化性和成膜性较差，需要与其他具有良好的乳化性能的材料结合使用[16]。β 环糊精（β-CD）作为一种新型的食药辅料可以提高功能性成分的稳定性，促进溶解能够形成稳定的水合物。目前关于蛋白类物质形成微胶囊的研究较少，由于乳清蛋白（WP）、大豆分离蛋白（SPI）和酪蛋白酸钠（NaCas）具有良好的乳化性能以及成膜性能。因此，本研究以 SCP-NE 为原材料，MD 分别与 β-CD、SPI、WP、NaCas 结合作为壁材，以喷雾干燥法制备 SCP-NE 微胶囊，通过响应面法优化配方，得到 SCP-NE 微胶囊最佳制备条件，对 SCP-NE 微胶囊进行体外释放研究，为 SCP 更好地应用于保健品、药品等领域的研究开发提供理论参考。

1　实验

1.1　材料与仪器

主要材料：甜玉米芯多糖纳米乳液（SCP-NE），实验室自制；麦芽糊精（MD）、大豆分离蛋白（SPI）、β 环糊精（β-CD）、酪蛋白酸钠（NaCas）、乳清蛋白（WP），分析纯，山东优索化工科技有限公司；胃蛋白酶（1 200 U/g），分析纯，中国惠世生化试剂有限公司；胰蛋白酶（4 000 U/g），分析纯，源叶生物科技有限公司。

主要仪器：数显型恒温水浴锅，国华电器有限公司；MC 型精密电子天平，北京赛多利斯仪器系统有限公司；TG16-WS 型离心机，湖南湘仪仪器有限公司；BXT-200MLH 型喷雾干燥机，德国巴谢特电气集团；SU3800 型扫描电子显微镜，日本日立有限公司；Nano-ZS90 型激光粒度仪，英国马尔文仪器有限公司；360 智能型红外光谱仪，美国尼高力仪器有限公司；STA 6000 型热重分析仪，德国珀金埃尔默仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　微胶囊的制备

参考 Niu 等[17]的方法并稍作修改，分别将 β-CD、SPI、WP、NaCas 与 MD，在磁力搅拌下分散到去离子水中，再经过高速剪切（1 000 r/min），形成壁液。在壁液中逐渐加入 SCP-NE，并不断搅拌 40 min（300 r/min），总固型物体积分数（简称为固形物含量）为 20%，最后进行高压均质，再以喷雾干燥法制备 SCP-NE 微胶囊，喷雾干燥器以 5 mL/min 的液体流速，调整 160 ℃进风温度，80 ℃的出风温度。

1.2.2　单因素实验设计

研究表明单一的 MD 作为壁材对 SCP-NE 包埋效果不佳，将 MD 分别与 β-CD、SPI、WP、NaCas 按照质量比为 1∶1 复配作为壁材，总体固形物含量为 20%，芯壁比为 1∶2，高速剪切时间为 15 min，考察不同种类的壁材对 SCP-NE 包封率的影响。MD 与 SPI 复配形成的微胶囊粒径分布均匀，且包封率较高，总体固形物含量为 20%，芯壁比为 1∶2，高速剪切时间为 15 min，分别考察 MD 与 SPI 复配质量比 3∶1、2∶1、1∶1、1∶2、1∶3 对 SCP-NE 包封率的影响。MD 与 SPI 复配质量比为 1∶1，芯壁比为 1∶2，高速剪切时间为 15 min，分别考察总体固形物含量为 10%、15%、20%、25%、30%对 SCP-NE 包封率的影响。以 MD 与 SPI 质量比 1∶1 复配为壁材，总体固形物为 20%，高速剪切时间为 15 min，考察芯壁比分别为 2∶1、1∶1、1∶2、1∶3、1∶4 对 SCP-NE 包封率的影响。

1.2.3　响应面实验设计

在单因素的基础上，采用 Box-Behnken 设计（BBD）。响应值为包封率，选择壁材复配比、固形物含量、芯壁比进行响应曲面设计，响应面因素水平见表 1。

1.2.4　甜玉米芯多糖纳米乳微胶囊的性能测定

1.2.4.1　包封率测定

采用苯酚硫酸法测定多糖含量。称取 1 g SCP-NE 微胶囊，用 20 mL 浓度为 0.05 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH=7.4）

表 1　响应面实验的因素与水平

Tab.1 Response surface test factors and levels

水平	复配比（m_{MD}∶m_{SPI}）（A）	芯壁比（B）	固形物含量（C）/%
−1	2∶1	1∶1	15
0	1∶1	1∶2	20
1	1∶2	1∶3	25

快速冲洗微胶囊表面。洗涤后，摇匀，4 000 r/min，20 min 后收集水相，取 1 mL 水相，加入 1 mL 蒸馏水，1 mL 苯酚溶液（0.06 g/mL），最后加入 5 mL 浓硫酸，震荡摇匀，沸水浴 15 min，在 490 nm 波长下检测吸光度值，测得微胶囊表面多糖的含量。计算式见式（1）。

$$\eta=\frac{m_t-m_s}{m_t}\times 100\% \tag{1}$$

式中：η 为包封率；m_t 为总多糖质量；m_s 为表面多糖质量。

1.2.4.2　粒径测定

将 SCP-NE 微胶囊溶解于蒸馏水中配置成质量浓度为 1 mg/mL 的溶液，采用激光粒度仪对 SCP-NE 微胶囊进行粒径测定。

1.2.4.3　红外光谱测定

对 SCP-NE 微胶囊及其原料进行红外光谱（FT-IR）分析，室温下样品/KBr 质量比为 1，光谱分辨率为 4 cm^{-1}，光谱的波长范围为 500~4 000 cm^{-1}。

1.2.4.4　热重测定

取 5.0~7.0 mg SCP-NE 微胶囊，以 10 ℃/min 的速率从 30 ℃加热到 600 ℃，观测在不断升高的温度下甜玉米芯多糖纳米乳微胶囊的质量变化。

1.2.4.5　体外释放测定

首先取 100 mg 的 SCP-NE 微胶囊置于模拟胃液（SGF，pH=1.7，用盐酸溶液配制）中 2 h。然后，去除 SGF，加入模拟肠液（SIF，pH=7.4，用浓度为 0.02 mol/L 的磷酸盐缓冲液配制）中 4 h。在此期间，取 2 mL 溶液，用等体积的模拟胃肠液替换，以保持溶液体系恒定体积。

1.3　数据处理

每组实验均重复 3 次，所有数据均以±标准差的形式表示，采 Design-Expert 13 完成响应面实验数据处理，采用 Origin 2021 完成图表绘制。

2　结果与分析

2.1　甜玉米芯多糖纳米乳微胶囊的制备工艺优化

2.1.1　单因素实验结果分析

将 MD 分别与 β-CD、SPI、NaCas、WP 复合作为壁材，如图 1a 所示。当 MD 与 SPI 复合时微胶囊具有较大的包封率，且 MD 与蛋白类壁材复合包封效

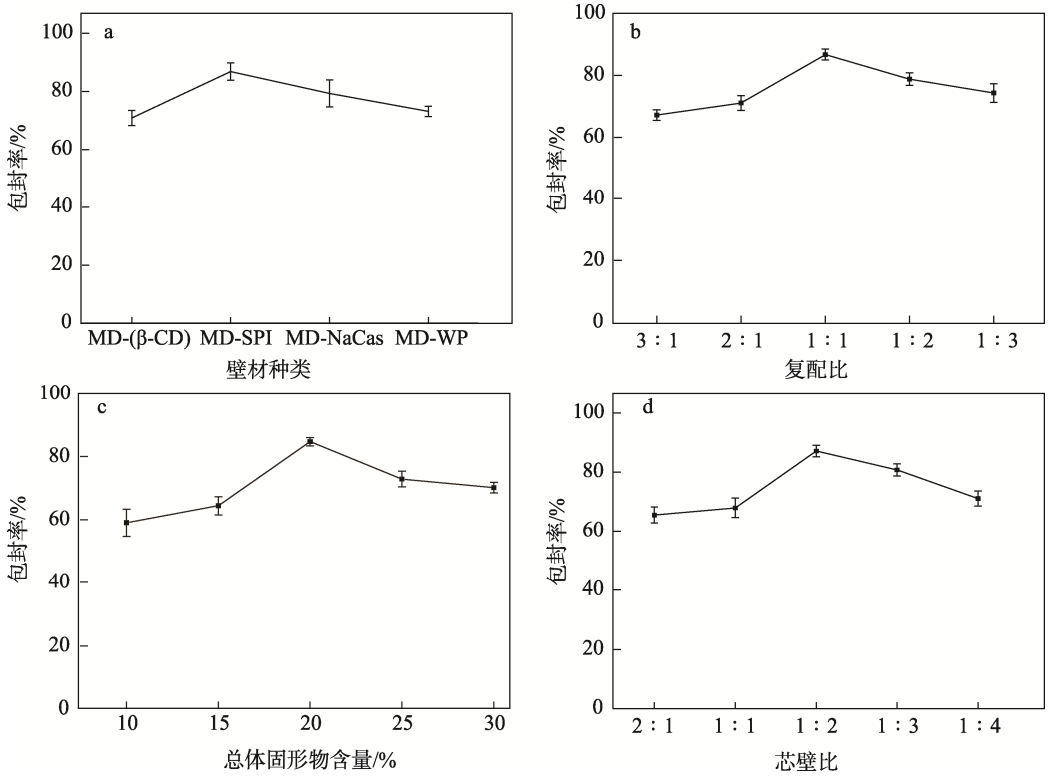


图 1　单因素实验结果

Fig.1 Single factor experimental results

率均高于 MD 单独作为壁材或者 MD 与 β-CD 复合。这表明蛋白的添加改善了 MD 的性能，提高包封率，而 MD 与 SPI 复合时获得最高的包封效率，这可能是由于 SPI 具有较好的乳化性能[18]，所以后续选择 MD 与 SPI 复合作为壁材。由图 1b 可知，当 MD 与 SPI 的质量比为 1∶1 时，包封率具有显著的提高（P<0.05），表明在此比例下 MD 与 SPI 更好地发挥性能，将 SCP 包在壁材之中。由图 1c 可知，在不同的芯壁比条件下，包封效率也会受到影响，而当芯壁比为 1∶2 时，芯材更好地封装在壁材中，当比例增加到 1∶3 时，包封率降低。由图 1d 可知，总体固形物含量也是影响包封率的重要因素，当总体固形物含量为 20%时，包封率达到最高值，于是选取总体固形物含量 20%为后续实验。根据单因素实验可以得出 SCP-NE 微胶囊最佳制备条件：m（MD）∶m（SPI）= 1∶1、芯壁比为 1∶2、总体固形物含量为 20%。

2.1.2　响应面实验结果分析

根据单因素实验结果，设计表 2 响应面因素水平表，得到响应面结果见表 2，方差分析结果见表 3。将得到的包封率采用 Design-Expert 软件进行拟合，可得多元回归方程：Y=87.44+1.71A+0.50B−0.53C+0.03AB+0.20AC−0.78BC−4.25A^2−1.52B^2−2.49C^2。预测的最佳 SCP-NE 微胶囊制备条件：MD 与 SPI 质量比为 1∶1、芯壁比为 1∶2、总体固形物含量为 20%，此时包封率理论值为 87.70%。

表 2　响应面实验设计与结果

Tab.2 Response surface test design and results

试验号	复配比（m_{MD}∶m_{SPI}）（A）	芯壁比（B）	固形物含量（C）/%	包封率/%
1	1（1∶2）	0(1∶2)	1(25)	81.1
2	−1(2∶1)	0	1	78.3
3	0(1∶1)	1(1∶3)	−1(15)	84.9
4	1	0	−1	82.7
5	0	0	0(20)	87.1
6	1	−1(1∶1)	0	83.5
7	0	0	0	87.9
8	−1	−1	0	79.1
9	−1	1	0	79.8
10	0	−1	1	83.5
11	0	0	0	86.9
12	−1	0	−1	80.7
13	1	1	0	84.3
14	0	0	0	87.4
15	0	−1	−1	82.1
16	0	0	0	87.9
17	0	1	1	83.2

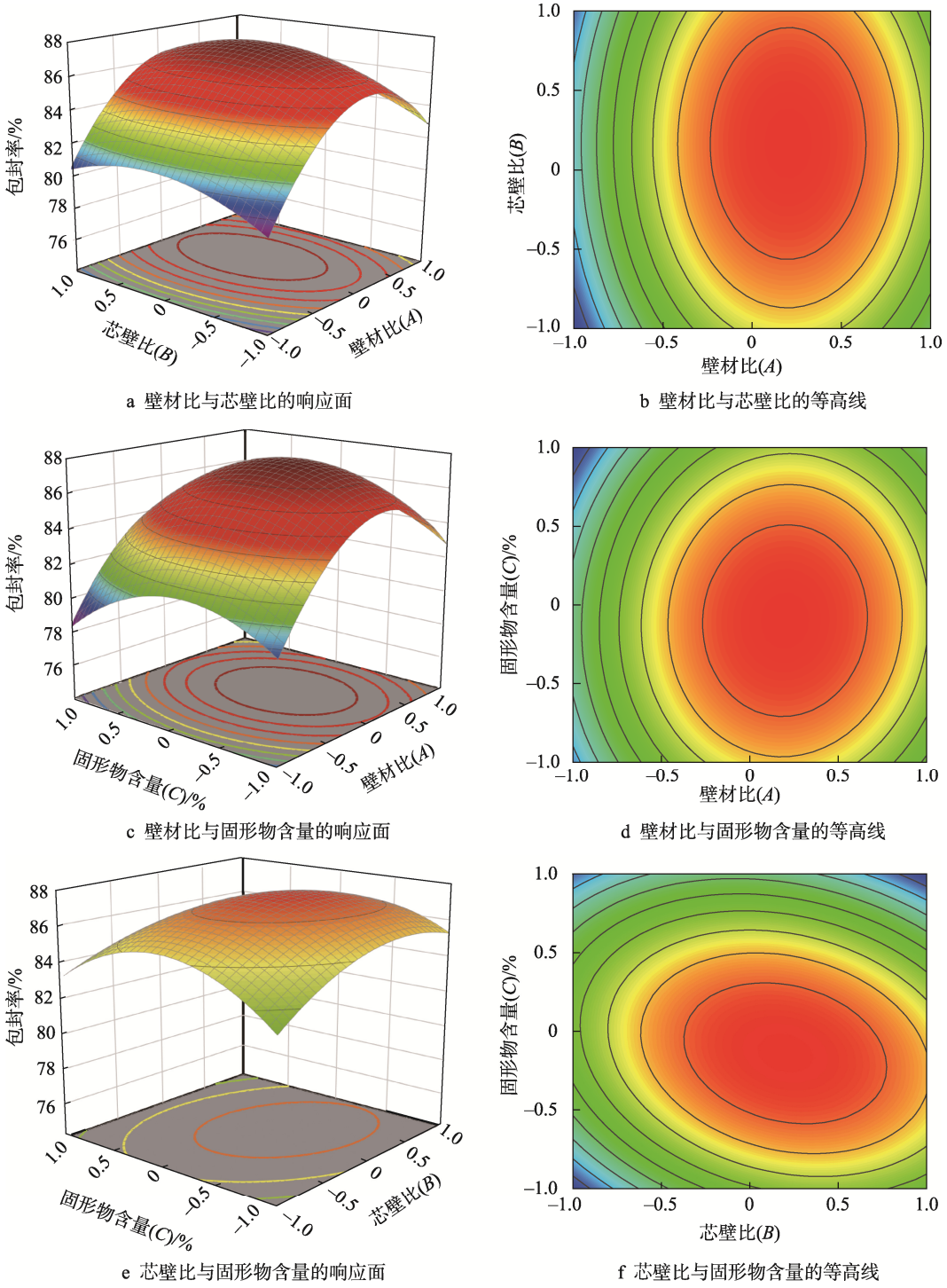
表 3　方差分析

Tab.3 Analysis of variance

来源	系统估值	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型		152.61	9	16.96	24.89	0.000 2	**
常数项	87.44						
A	1.71	23.46	1	23.46	34.43	0.000 6	**
B	0.50	2.00	1	2.00	2.94	0.130 4	
C	−0.54	2.31	1	2.31	3.39	0.108 1	
AB	0.025	0.002 5	1	0.002 5	0.003 7	0.953 4	
AC	0.20	0.16	1	0.16	0.23	0.642 8	
BC	−0.78	2.40	1	2.40	3.53	0.102 5	
A^2	−4.25	75.87	1	75.87	111.36	<0.000 1	**
B^2	−1.52	9.73	1	9.73	14.28	0.006 9	**
C^2	−2.49	26.21	1	26.21	38.47	0.000 4	**
残差		4.77	7	0.68			
失拟项		3.94	3	1.31	6.31	0.053 6	不显著
纯误差		0.83	4	0.21			
总和		157.38	16				

如表 3 所示，该模型的 F 值为 8.23，P 值远小于 0.01，表明模型显著，具有统计学意义；该模型回归方程失拟项 P 值为 0.053 6，说明试验结果无明显差异，模型的拟合程度良好。各因素对包封率的影响从大到小为 A（壁材复合比）、C（固形物含量）、B（芯壁比）；其中 A^2、B^2、C^2 3 项的显著性水平 P<0.01，这说明壁材复合比、芯壁比与固形物含量 3 个因素对包封率的影响都极显著。

如图 2 所示，分别表示各因素之间相互作用对 SCP-NE 微胶囊包封率的影响。根据 F 值可知，各因素相互作用的偏回归系数 P>0.05，说明各因素间交互作用均对 SCP-NE 微胶囊包封率无显著影响。各因素交互作用对 SCP-NE 微胶囊包封率的影响从大到小次序为 BC、AC、AB。



a 壁材比与芯壁比的响应面　　b 壁材比与芯壁比的等高线

c 壁材比与固形物含量的响应面　　d 壁材比与固形物含量的等高线

e 芯壁比与固形物含量的响应面　　f 芯壁比与固形物含量的等高线

图 2　两因素间交互作用对 SCP-NE 微胶囊包封率影响的响应面图与等高线图

Fig.2 Response surface and contour plots of interaction between two factors on SCP-NE microcapsules entrapment efficiency

模型预测的最佳 SCP-NE 微胶囊制备条件：MD 与 SPI 质量比为 1∶1.4、芯壁比为 1∶2.2、总体固形物含量为 19.35%，此时包封率理论值为 87.70%。将试验条件修正为 MD 与 SPI 质量比为 2∶3、芯壁比为 1∶2、总体固形物含量为 20%，此实验条件进行验证实验得到包封率为（87.6±1.3）%，与预测值无显著差异（P>0.05）。说明实验结果与模型拟合良好，响应面模型具有一定可行性，后续选择修正后的实验条件制备微胶囊进行性能分析。

2.2　甜玉米芯多糖纳米乳微胶囊的性能分析

2.2.1　粒径分析

采用激光粒度仪测得以 MD 和 SPI 作为壁材的 SCP-NE 微胶囊粒径尺寸分布，如图 3 所示。总体上微胶囊粒径呈正态分布，且为单峰分布。不同壁材对粒径大小分布具有一定的影响[19]，以 MD/SPI 为壁材时，微胶囊平均粒径为（15.19±0.97）μm，粒径分布为 1~20 μm，平均粒径较小，且粒径分布均匀。

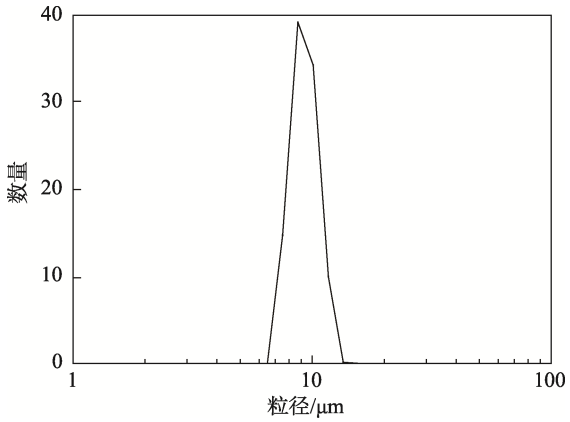


图 3　SCP-NE 微胶囊的粒径分布
Fig.3 Particle size distribution of SCP-NE microcapsules

2.2.2　红外光谱分析

傅里叶变换红外光谱（FTIR）可以证明微胶囊的形成与物质之间是否存在相互作用。以 MD 和 SPI 作为壁材制备的 SCP-NE 微胶囊样品的红外光谱如图 4 所示。SCP 在 3 383 cm^{-1} 处的吸收峰是由于 O—H 键振动造成的，表明 SCP 中存在羟基，而 2 932 cm^{-1} 与 1 630 cm^{-1} 处的吸收峰是由于 C—H 振动和结合水造成的，1 402 cm^{-1} 的特征峰是由于 C—O 伸缩振动引起的，1 038 cm^{-1} 处形成的峰是由于多糖环上 C—O—O 键不对称伸缩引起的，这是右旋糖酐的特征信号，构成了多糖独有的吸收峰。而在微胶囊中这些吸收峰明显减弱，这可能是微胶囊中多糖含量较少，而且相当一部分被包封在 MD-SPI 壁材基质中间[20]。

2.2.3　热重分析

热分析是反应食品材料发生热变化时，干燥、脱水、去羟基化、熔化、糊化和玻璃化转变信息的重要途径。如图 5 所示，MD 与 SPI 复配形成的 SCP-NE 微胶囊热重图，整体上看微胶囊质量损失分为 3 个阶段：第 1 个阶段为 80~120 ℃，微胶囊有 5%左右的质量损失，这可能是由于水分挥发造成；第 2 个阶段为 250~350 ℃，微胶囊在此温度下分为 2 个较为明显的阶段，整个过程相对平缓，防止在较高的温度下壁材快速分解后芯材分解导致质量急剧下降，能够有效避免芯材物质的损失；第 3 个阶段是 400~600 ℃，整个样品质量逐渐趋于平缓，直到完全降解。此实验结果与刘楠楠[21]制备的芝麻油微胶囊具有类似的热重损失效果。蛋白质在受热后会发生二级、三级以及四级结构变化，此结果表明 MD 与蛋白质作为壁材可以提高 SCP 的热稳定性。

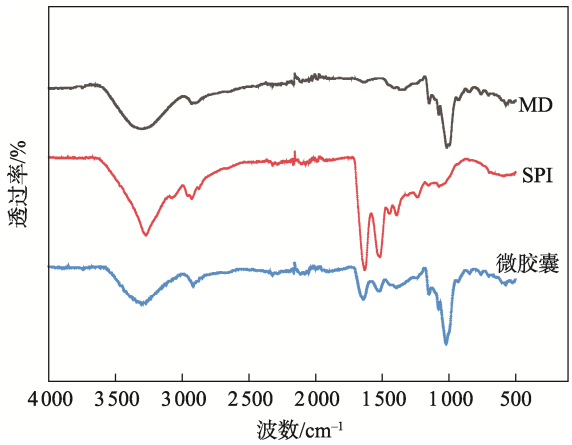


图 4　SCP-NE 微胶囊的红外光谱分析
Fig.4 Infrared spectroscopic analysis of SCP-NE microcapsules

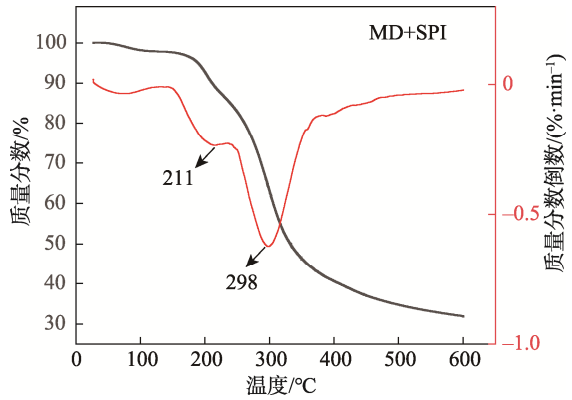


图 5　SCP-NE 微胶囊的热重分析
Fig.5 Thermogravimetric analysis of SCP-NE microcapsules

2.2.4　体外释放分析

微胶囊壁材种类、形态、粒径分布、包封率等均对 SCP 在胃肠道的释放产生影响。在研究微胶囊的体外释放过程中，将微胶囊置于模拟胃液（SGF）中 2 h，然后置于模拟肠液（SIF）4 h。图 6 显示了以

MD 与 SPI 复合作为壁材制备的 SCP-NE 微胶囊中 SCP 的释放曲线。在前 2 h 的胃液消化中，微胶囊的释放率为 8.83%，这种释放行为与 Shao 等[22]制备的灵芝多糖微胶囊体外释放结果相似。相较于模拟胃液，SCP 在模拟肠液中释放显著增加，这可能是随着 pH 的增加，蛋白质中的羧酸基团开始电离，静电斥力增加，导致聚合物结构松动[23]。微胶囊在模拟肠液中 1 h 的释放量为 62.87%，2 h 后几乎完全释放，MD/SPI 具有较好的表面形貌和包封率，达到了 SCP 在胃液中释放速度缓慢，在模拟肠液中快速释放的效果。这可能是由于SCP-NE在蛋白质类壁材的包埋下，在酸性胃液环境中蛋白质分解较少，而在碱性环境中蛋白质壁材能够快速分解释放，从而提高 SCP 在肠道的吸收利用效率。

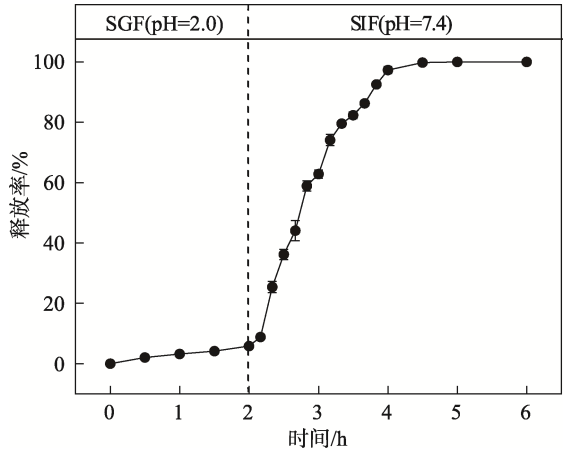


图 6　SCP-NE 微胶囊中 SCP 的体外释放曲线
Fig.6 In vitro release curve of SCP from SCP-NE microcapsules

3　结语

为减少 SCP 在胃液中释放，提高 SCP 在肠道中利用效率，在 SCP-NE 基础上，以复合蛋白为壁材制备成SCP-NE微胶囊，达到在肠液中控制释放的目的。以包封率为评价指标，壁材种类、壁材复配比、总体固形物含量、芯壁比为单因素，以响应面对配方进行优化得到最佳的制备条件：MD与SPI质量比为2∶3、芯壁比为 1∶2、总体固形物含量为 20%，以此实验条件下制备的SCP-NE微胶囊包封率为(87.6±1.3)%。通过激光粒度仪分析、傅里叶红外分析、热重分析，对 4 种不同壁材制备的 SCP-NE 微胶囊进行表征，探究其物化性质。最后将 SCP-NE 微胶囊进行体外模拟胃肠液释放研究，SCP-NE 微胶囊在前 2 h 的胃液消化中释放率为 8.83%，在模拟肠液中 1 h 的释放量为 62.87%。

综上所述，本研究提高了 SCP 利用效率，以 MD 和 SPI 作为壁材制备 SCP-NE 微胶囊，在物化性质和模拟胃肠液释放中表现良好，本研究为进一步探究 SCP 在体内吸收和代谢过程提供理论依据，促进 SCP 后续在功能性食品、药品等方面的应用。

参考文献：

[1] CHENG H, HUANG G L. Extraction, Characterisation and Antioxidant Activity of Allium Sativum Polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 415-419.

[2] 张淑杰, 康玉凡. 天然活性多糖研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 379-382.
ZHANG S J, KANG Y F. Advances in Bio-Active Polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(2): 379-382.

[3] SUN C X, CHEN Y, LI X Z, et al. Anti-Hyperglycemic and Anti-Oxidative Activities of Ginseng Polysaccharides in STZ-Induced Diabetic Mice[J]. Food & Function, 2014, 5(5): 845-848.

[4] JI X L, PENG Q, YUAN Y P, et al. Isolation, Structures and Bioactivities of the Polysaccharides from Jujube Fruit (Ziziphus Jujuba Mill.): A Review[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 349-357.

[5] 叶广英, 章金辉, 李杰, 等. 3 种石斛多糖及其降血糖活性的比较研究[J]. 天然产物研究与开发, 2020: 32(05): 727-733.
YE G Y, ZHANG J H, LI J, et al. Comparison of Polysaccharides and Its Hypoglycemic Activity from Three Dendrobium Species[J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(5): 727-733.

[6] LI J, WANG Y F, SHEN Z C, et al. Recent Developments on Natural Polysaccharides as Potential Anti-Gastric Cancer Substance: Structural Feature and Bioactivity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 232: 123390.

[7] WANG X, XIU W Y, HAN Y, et al. Structural Characterization of a Non-Starch Polysaccharide from Sweet Corn Cobs[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(9): 427-439.

[8] 覃树林, 王新明, 孙保剑, 等. 玉米芯综合利用研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2014, 36(2): 23-27.
QIN S L, WANG X M, SUN B J, et al. Advance in Comprehensive Utilization of Corncobs[J]. Biotic Resources, 2014, 36(2): 23-27.

[9] DASGUPTA N, RANJAN S, GANDHI M. Nanoemulsion Ingredients and Components[J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(2): 917-928.

[10] 郝艳霜, 魏军, 陈福星. 藏蒲公英多糖纳米乳剂的制

备及性质研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(6): 236-239.
HAO Y S, WEI J, CHEN F X. Preparation and Properties of Tibetan Dandelion Polysaccharide Nanoemulsion[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(6): 236-239.

[11] 姚云霞, 李云, 李媛, 等. 纳米乳在药剂学中的研究及应用进展[J]. 军事医学, 2021, 45(6): 473-478.
YAO Y X, LI Y, LI Y, et al. Applications of Nanoemulsion in Pharmaceutics[J]. Military Medical Sciences, 2021, 45(6): 473-478.

[12] 李树鹏. 黄芪多糖纳米乳的制备及其免疫佐剂效应研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
LI S P. Preparation and Effection of Astragalus Polysaccharide Nanoemulsion on Immune Adjuvant[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012.

[13] ARWA S, FARAH N, ASHRAF S M, et al. Nanoemulsions: Formation, Stability and an Account of Dietary Polyphenol Encapsulation[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(9): 4193-4205.

[14] FUIOR E V, DELEANU M, CONSTANTINESCU C A, et al. Functional Role of VCAM-1 Targeted Flavonoid-Loaded Lipid Nanoemulsions in Reducing Endothelium Inflammation[J]. Pharmaceutics, 2019, 11(8): 391.

[15] 冉欢, 夏晓霞, 赵吉春, 等. 纳米喷雾干燥法制备食品生物活性成分微胶囊研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 318-325.
RAN H, XIA X X, ZHAO J C, et al. Preparation of Food Bioactive Ingredient Nanocapsules by Nano Spray Drying: A Review[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 318-325.

[16] LEE S M, AR R C, SANG H Y, et al. Effects of Maltodextrins with Different Dextrose-Equivalent Values[J]. Flavour And Fragrance Journal, 2018, 33(2): 153-159.

[17] NIU B, FENG S M, XUAN S Q, et al. Moisture and Caking Resistant Tremella Fuciformis Polysaccharides Microcapsules with Hypoglycemic Activity[J]. Food Research International, 2021, 146: 110420.

[18] 冯思瑞. 多糖复合和糖基化改性对大豆分离蛋白的结构、物化特性及乳化功能的影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022.
FENG S R. Effect of Polysaccharide Complexation and Glycation Modification on the Structure, Physical and Chemical Properties and Emulsification Function of Soybean Isolate Protein[D]. Zhejiang Gongshang University, 2022.

[19] FENG X Y, DU C L, LI J B. Molecular Assembly of Polysaccharide-Based Microcapsules and Their Biomedical Applications[J]. Chemical Record, 2016, 16(4): 1991-2004.

[20] MENG Q Y, ZHONG S L, GAO Y, et al. Advances in Polysaccharide-Based Nano/Microcapsules for Biomedical Applications: A Review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 878-891.

[21] 刘楠楠. 喷雾干燥法制备芝麻油微胶囊的研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 219-222.
LIU N N. Study of Microencapsulation Technology of Sesame Oil by Spray-Drying[J]. Food & Machinery, 2013, 29(1): 219-222.

[22] SHAO P, XUAN S Q, WU W C, et al. Encapsulation Efficiency and Controlled Release of Ganoderma Lucidum Polysaccharide Microcapsules by Spray Drying Using Different Combinations of Wall Materials[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125: 962-969.

[23] XIAO B Y, LIU Y, LUO M, et al. Evaluation of the Secondary Structures of Protein in the Extracellular Polymeric Substances Extracted from Activated Sludge by Different Methods[J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2019, 80: 128-136.