

黄花菜多糖包埋沙棘果油微胶囊制备的研究

张磊¹, 任雅欣¹, 张悦², 王桃鸯¹, 王妍¹, 李宁¹
(山西大同大学化学与化工学院¹, 大同 037009)
(山西大同大学农学与生命科学学院², 大同 037009)

摘要:通过复合凝聚法,以沙棘果油(SBFO)为芯材,分别构建黄花菜多糖(HCBP)与大豆分离蛋白(SPI)、乳清分离蛋白(WPI)及酪蛋白酸钠(SC)的复合壁材微胶囊。采用浊度法确定最佳包埋条件,SPI:HCBP、WPI:HCBP及SC:HCBP的质量比分别为2:1、2:1和1:1,pH分别为3.8、4.0、3.6。微观观察显示芯材被有效包埋。红外光谱分析表明,微胶囊壁材复合机制主要依赖于HCBP的羧基和蛋白质氨基之间的静电相互作用或氢键结合,且芯材与壁材之间保持物理包埋。X射线衍射图谱呈现典型无定形特征。性能评价显示3种微胶囊热稳定性优异,200℃以内未发生分解,且体外模拟消化实验展现胃液中相对稳定、肠液中缓释的释放特性。

关键词:黄花菜多糖;沙棘果油;微胶囊;复合凝聚法;体外模拟消化

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001262

中图分类号:TS221 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0153-09

网络首发时间:2025-11-07 16:07:09

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251107.1437.002>

Research on preparation of microcapsules embedding sea buckthorn fruit oil microcapsules with *Hemerocallis citrina* Baroni polysaccharide

Zhang Lei¹, Ren Yaxin¹, Zhang Yue², Wang Taoyang¹, Wang Yan¹, Li Ning¹

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi Datong University¹, Datong 037009)

(School of Agriculture and Life Sciences, Shanxi Datong University², Datong 037009)

Abstract: By complex coacervation, microcapsules were prepared with sea buckthorn fruit oil as the core material and composite wall materials consisting of *Hemerocallis citrina* Baroni polysaccharide (HCBP) combined with soy protein isolate (SPI), whey protein isolate (WPI), and sodium caseinate (SC), respectively. The turbidimetric method was used to determine the optimal embedding conditions; the mass ratios for SPI:HCBP, WPI:HCBP, and SC:HCBP were determined to be 2:1, 2:1, and 1:1 respectively, and corresponding optimal pH values were 3.8, 4.0, and 3.6. Microscopic observations confirmed that the core material was effectively encapsulated. FT-IR analysis indicated that the complexation mechanism of wall material primarily relied on electrostatic interactions or hydrogen bonding between carboxyl groups of HCBP and the amino groups of proteins, and physical encapsulation was maintained between the core material and the wall materials. X-ray diffraction (XRD) patterns showed typical amorphous characteristics. Performance evaluation demonstrated that the three types of microcapsules had excellent thermal stability, without decomposition below 200 °C. In addition, *in vitro* simulated digestion experiments revealed that the microcapsules were relatively stable in gastric fluid and exhibited sustained-release characteristics in intestinal fluid.

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2023L254)

收稿日期:2025-04-25

第一作者:张磊,男,1981年出生,讲师,天然产物化学,zhanglei2519@126.com

通信作者:李宁,男,1985年出生,副教授,天然产物化学,lin224@nenu.edu.cn

Key words: *Hemerocallis citrina* Baroni polysaccharide; sea buckthorn fruit oil; microcapsule; complex coacervation; *in vitro* simulated digestion

黄花菜 (*Hemerocallis citrina* Baroni), 又名金针菜、健脑菜和忘忧草, 是阿福花科萱草属多年生草本植物, 在我国南北各地均有栽种^[1]。其在甘肃庆阳、陕西大荔、山西大同、河南邵阳等地作为一种重要的经济作物, 具有较大的种植规模。黄花菜不仅具备食用和观赏价值, 还具备药用价值, 其根、叶、茎、花均可入药, 黄花菜提取物的化学成分主要有黄酮类、萜醌类、挥发油类、生物碱类、糖类等^[2]。黄花菜中糖含量丰富, 总糖质量分数为 47.9% ~ 64.4%^[3]。黄花菜多糖 (HCBP) 是一种提取自黄花菜的水溶性杂多糖, 可通过水提醇沉法、微波辅助提取法、超声辅助提取法等方法获得, 其提取率通常超过 20%, 甚至能达到 30%^[4]。此外, 黄花菜多糖还具有多种药理活性, 有助于抗氧化^[5]、抗菌^[6]、抗肿瘤^[7]、降血糖^[8]等。

我国沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.) 资源丰富, 其果实提取物沙棘果油 (SBFO) 富含脂肪酸、维生素 E、植物甾醇和类胡萝卜素等高值活性成分, 尤其类胡萝卜素含量丰富, 可作为天然补充剂加以开发利用^[9]。沙棘果油对高血压、血脂异常等心血管系统疾病和某些皮肤病具有改善作用, 同时还有抗菌活性^[10]。目前, 沙棘果油除可直接食用外, 已广泛应用于饼干、糖果等产品。然而, 沙棘果油存在稳定性差、水中难溶解、易氧化劣变等问题, 严重影响了其应用范围和市场推广^[11]。

微胶囊包裹技术广泛应用于食品加工领域, 可起到保护芯材, 掩盖不良风味, 持续释放的作用^[12]。复合凝聚法是制备微胶囊的一种常用方法, 其基于 2 种或多种带相反电荷的高分子聚合物之间的静电吸引作用, 将芯材包裹其中。微胶囊由芯材和壁材两部分组成。常用的生物大分子壁材可分为蛋白质和多糖两大类。蛋白质主要选用明胶、乳清分离蛋白、酪蛋白酸钠及大豆分离蛋白等乳化性、成膜性、水溶解性良好的蛋白质。多糖主要选用阿拉伯胶、海藻酸盐、壳聚糖和淀粉及其衍生物等。阿拉伯胶是一种两亲性的天然阴离子多糖^[13], 具有强乳化稳定性、良好的水溶性及低黏度, 因此成为微胶囊制备的首选壁材之一。海藻酸提取于海带、巨藻等海洋植物, 其阳离子盐微胶囊因制备温和, 生物相容性、安全性高, 广泛用于食品、医药和生物技术领域^[14]。壳聚糖是天然阳离子多糖, 生物相容性好, 成膜性好, 具有

生物活性^[15]。淀粉及其衍生物, 成本低, 成膜性和乳化性好, 食用安全^[16]。这些多糖, 性能各异, 在实际使用中需综合考虑溶解性、乳化性、适宜酸碱度等因素进行选用。然而, 随着微胶囊技术的快速发展, 开发新型芯材、新型壁材成为关注的焦点。

目前, 关于黄花菜多糖的应用研究较少, 将其作为微胶囊壁材的研究鲜见报道。本研究以沙棘果油为芯材, 以黄花菜多糖为多糖壁材, 分别结合大豆分离蛋白、乳清分离蛋白及酪蛋白酸钠, 采用复合凝聚法制备微胶囊。系统评价微胶囊的包埋效果、微观形貌、产率、化学键变化、晶体结构、热稳定性及体外释放特性, 以期对沙棘果油的精深利用及黄花菜多糖新型壁材的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄花菜多糖 (HCBP), 依据文献^[17]方法制备, 淡黄色粉末, 多糖质量分数 85.56%, $M_w = 4.166$ ku, $M_w/M_n = 1.134$; 沙棘果油 (SBFO), 依据文献^[18]方法制备, 呈深红色透明状液体, 酸价 3.51, 碘值 63, 过氧化值 0.02%; 蔗糖脂肪酸酯 (SFAE)、酪蛋白酸钠 (SC)、乳清分离蛋白 (WPI) 和大豆分离蛋白 (SPI) 为食品级; 胰蛋白酶 (50 000 U/g) 和胃蛋白酶 (10 000 U/g) 为生化分析级; 戊二醛、盐酸、氢氧化钠和无水乙醇, 均为分析纯。

1.2 仪器与设备

RCD-1A 高速均质乳化机、722N 可见分光光度计, SmartLab SEX 射线衍射仪、TGL-15B 台式高速离心机 FTIR-650 红外光谱仪、STA 499C 同步热分析仪、SU8010 场发射扫描电镜。

1.3 实验方法

1.3.1 浊度的测定

将大豆分离蛋白 (SPI) 与黄花菜多糖 (HCBP) 按质量比 1:2、1:1、2:1 分别配制成质量分数为 0.1% 的溶液, 放置于 45 °C 的恒温水浴锅中。加入质量分数 5% 氢氧化钠溶液将体系的 pH 调至 7.0, 然后, 逐滴向烧杯中滴加浓度为 0.1 mol/L 或 1.0 mol/L 的盐酸溶液, 使体系的 pH 以 0.2 梯度下降, 直到降至 2.0^[19]。测定并记录每个梯度在 600 nm 波长处的吸光度, 绘制 SPI-HCBP 浊度曲线。按上述方法测定

WPI-HCBP、SC-HCBP 的浊度值,并绘制浊度曲线。

1.3.2 复聚物的制备方法

最佳壁材比及最适 pH 见表 1。分别配制质量分数均为 1% 的 3 种蛋白质、HCBP 溶液。取配制好的蛋白质溶液和 HCBP 溶液,按表 1 的最佳壁材质量比混合。将混合溶液置于 45 °C 水浴中,以 500 r/min 的速度搅拌 30 min,期间用浓度为 1.0 mol/L 的盐酸调节 pH 至表 1 中最适 pH。搅拌后,降至室温。于 4 °C 冰箱中静置 12 h。6 000 r/min 离心 15 min。沉淀转移至培养皿中预冻,真空冷冻干燥 48 h,得复聚物。

表 1 最佳壁材质量比及最适 pH

样品	最佳壁材质量比	最适 pH
SPI-HCBP	2:1	3.8
WPI-HCBP	2:1	4.0
SC-HCBP	1:1	3.6

1.3.3 微胶囊的制备方法

微胶囊的制备采用复合凝聚法。分别配制质量分数为 1% 的 3 种蛋白质溶液、HCBP 溶液。根据表 1 的壁材质量比,取蛋白质溶液,按照芯壁质量比为 1:1 添加沙棘果油,芯乳化剂质量比 1:1 添加蔗糖脂肪酸酯,在均质机 10 000 r/min 下均质 10 min。缓慢加入配制好的 HCBP 溶液,用均质机同转速均质 5 min,完成聚合物乳液的制备。用显微镜观察后,缓慢滴加 1.0 mol/L 的盐酸溶液,调节 pH 至表 1 中的数值,室温下搅拌 30 min,进行复凝聚反应。搅拌结束后,加入 4.0 mL 固化剂戊二醛,并将 pH 调至 6,再用磁力搅拌器搅拌 10 min,于 4 °C 冰箱静置 12 h,使微胶囊充分固化。6 000 r/min 离心 15 min,沉淀转移至培养皿中预冻。真空冷冻干燥 48 h,得到微胶囊成品。

1.3.4 光学显微镜观察

吸取聚合物乳液数滴至显微镜置物台上,采用 500 倍的放大倍数观察 3 种微胶囊湿囊。

1.3.5 扫描电子显微镜(SEM)观察

用导电双面胶固定冻干微胶囊于样品台上,去除表面残留粉末后经喷金处理。用 SEM 观察微胶囊样品的外部形貌特征^[20]。

1.3.6 微胶囊产率、包埋率的测定

根据公式计算微胶囊的产率($y_1/\%$)及包埋率($y_2/\%$)。

$$y_1 = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

$$y_2 = 1 - \frac{c_1}{c_2} \times 100\% \quad (2)$$

注: m_1 为冻干后微胶囊的质量/g; m_2 为初始加入样品的总质量/g; c_1 为微胶囊表面沙棘果油/g/mL 质量浓度; c_2 为微胶囊沙棘果油总质量浓度/g/mL。

1.3.6.1 沙棘果油标准曲线的绘制

精确称取 395.1 mg 沙棘果油样品,溶解于 50.00 mL 无水乙醇中。使用移液管精确移取 1.00、2.00、4.00、6.00、8.00 mL 样品至 10 mL 容量瓶中,加入无水乙醇定容并摇匀,于 450 nm 处测定吸光度。以沙棘果油浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,得到沙棘果油的标准曲线: $y = 0.135 1x + 0.001 9$, $R^2 = 0.999$ 。

1.3.6.2 微胶囊中沙棘果油总质量浓度的测定

称取 1.00 g 微胶囊样品,加入 60.00 mL 无水乙醇混合。混合物在超声波下处理 20 min 后,以 4 000 r/min 离心 15 min,离心液过滤,用一定比例无水乙醇稀释。在 450 nm 处测定吸光度,根据沙棘果油标准曲线计算出沙棘果油的浓度,即为微胶囊沙棘果油总质量浓度。

1.3.6.3 微胶囊表面沙棘果油质量浓度的测定

称取 1.00 g 微胶囊样品于干燥的 50 mL 西林瓶中,每次 20.00 mL,共加入 3 次无水乙醇并充分振荡。过滤并合并滤液,用一定比例无水乙醇稀释。在 450 nm 处测定吸光度,根据沙棘果油标准曲线计算出沙棘果油的浓度,即为微胶囊表面沙棘果油质量浓度。

1.3.7 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析

将 HCBP、SPI、WPI、SC、SBFO 及 SFAE,3 种复聚物、3 种微胶囊进行 FT-IR 扫描,扫描范围为 4 000 ~ 400 cm^{-1} ,得到红外吸收光谱^[21]。

1.3.8 X 射线衍射(XRD)分析

将 HCBP、SPI、WPI 及 SC,3 种复聚物、3 种微胶囊,均匀铺展于 XRD 样品槽中,进行扫描, 2θ 衍射角范围 5° ~ 50°;扫描速度 5(°)/min^[22]。

1.3.9 热重(TG)分析

采用热重分析仪对 3 种沙棘果油微胶囊样品进行测试,氮气为保护气(20 mL/min),升温速率为 10 °C/min^[23]。

1.3.10 微胶囊体外模拟消化

参考文献[24,25]的方法,配制模拟胃液(simulated gastric fluid,SGF)和模拟肠液(simulated intestinal fluid,SIF)。随后,称取 2.00 g 微胶囊样品加入到装有 50.00 mL SGF 中,在 37 °C 的条件下,于搅拌

器中以 100 r/min 的速度搅拌,模拟胃液消化 2 h,期间每小时量取混合液 2.00 × 3 mL,测定质量浓度,并计算芯材释放率。每次取样后用消化液补加至 50 mL,在结束模拟胃消化之后,用 1.0 mol/L 的 NaOH 调节溶液 pH 至 6.8 使胃蛋白酶失活,将制备好的 50.00 mL SIF 加入到上述溶液中,在同一温度和转速下,模拟肠液消化 6 h,期间每小时量取混合液 2.00 × 3 mL,测定芯材释放率。

释放率的计算见式(3)^[26]。

$$R_t = \frac{m_t}{m_a - m_b} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_t 为第 t 时沙棘果油累积释放率/%; m_t 为前 t 小时释放的沙棘果油总质量/mg; m_a 为 $(t-1)$ 时溶液中剩余的沙棘果油总质量/mg; m_b 为第 t 时移取消耗的沙棘果油质量/mg。

1.3.11 数据处理

实验样品均重复测定 3 次,结果以平均值 ± 标准偏差表示。采用 Origin 2022 软件绘图,利用 SPSS 26.0 软件,进行样品间的显著性分析($P < 0.05$),组间比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA)。

2 结果与讨论

2.1 壁材质量比及 pH 值对 3 种蛋白质与 HCBP 体系浊度的影响

生物大分子之间发生复合凝聚反应时,随着 pH 的改变形态会经历若干变化,这些变化从溶液外观上表现为体系浑浊程度的变化,可以用浊度表示。因此,浊度被广泛应用于观测生物大分子复合凝聚的过程^[27]。壁材质量比及 pH 对 3 种蛋白质与 HCBP 体系浊度的影响如图 1 所示,3 种蛋白质与 HCBP 不同比例混合体系的浊度,随 pH 的减小呈先上升后下降的趋势。当 pH 为 7.0 时,3 种混合体系均呈溶解的状态,浊度值最小。随着 pH 的降低,溶液开始变浑浊,浊度逐渐增大。浊度的增大意味着蛋白质与 HCBP 复合物体系,随着静电作用的增强,发生复凝聚反应。从原来的溶解状态,凝聚成固体颗粒。但变化过程略有不同,SPI-HCBP 体系在 pH 6.0~3.6 之间,浊度缓慢上升;WPI-HCBP 和 SC-HCBP 体系在 pH 值 5.0~3.6 之间,浊度快速上升。当浊度达到最大值时,开始下降,此时大分子聚合物重新溶解,溶液开始变得透明。但在 pH 约为 3.0 时,SPI-HCBP 浊度出现第 2 次极值,推测这是由于大豆分离蛋白含有 2 个亚基,2 个亚基分别与多糖发生复凝聚造成的。WPI-HCBP 和 SC-HCBP 体系

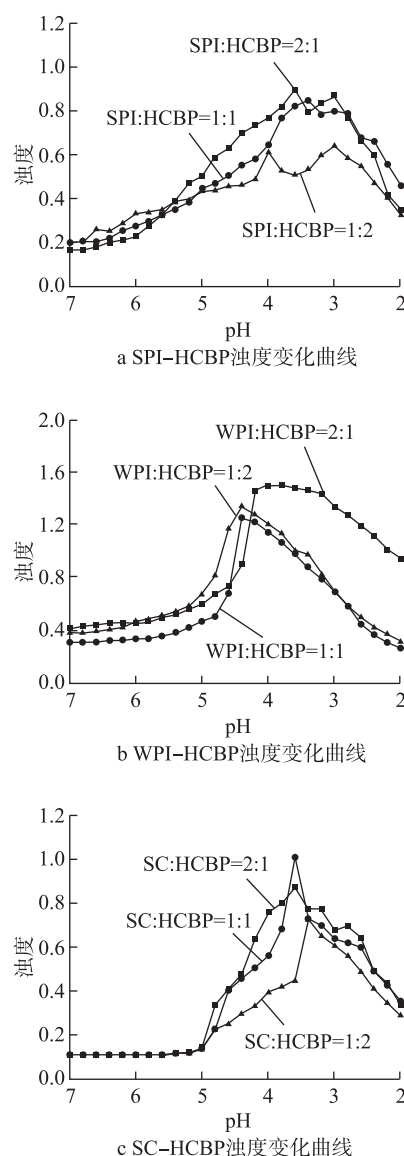


图 1 壁材质量比及 pH 对 3 种蛋白质与 HCBP 体系浊度的影响
未出现此现象。

复聚物浊度达到峰值时,蛋白质与 HCBP 之间的静电相互作用也达到最大,此时相分离的程度最大,是微胶囊形成的最佳条件^[28]。由图 1 中可知,HCBP 与不同蛋白质的混合比例不同,浊度曲线的变化存在差异。SPI:HCBP、WPI:HCBP 及 SC:HCBP 质量比分别为 2:1、2:1 和 1:1 时,存在该体系最大浊度值,可以作为 2 种生物大分子制备微胶囊的最适混合比例;浊度最大时的 pH 分别为 3.8、4.0 和 3.6。将此 pH 作为制备微胶囊的最适 pH 值。微胶囊制备过程中处于高酸值下时间较短,并且沙棘果油已被包裹,认为其质量受影响不大。此外,黄俊恺^[29]研究结果也表明,采用复凝聚法在 pH 4.2 条件下制备沙棘果油微胶囊,发现其各脂肪酸含量、总酚含量与原

油含量无明显变化。表明沙棘果油微胶囊制备过程的高酸值对微胶囊品质基本没有影响。

2.2 光学显微镜观察结果

3种湿囊光学显微镜图如图2所示,包裹物形成球状的微囊结构,部分微囊中部呈现浅色区域,被认为是包埋的沙棘果油;而全黑色的球体是蛋白质及多糖形成的较厚包裹层。此时可认为,沙棘果油已被包裹于微胶囊壳中。此外,对比3种沙棘果油微胶囊的图像发现,其外观尺寸大小较为集中。

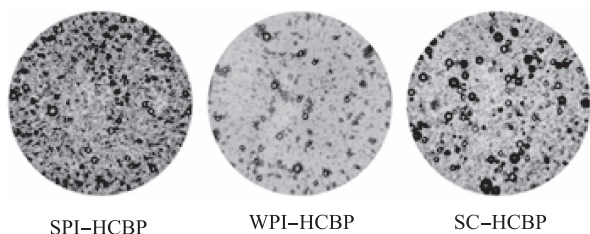


图2 3种湿囊光学显微镜图

2.3 SEM 观察结果

3种冻干微胶囊的SEM如图3所示,3种微胶囊均已沉积为块状结构,表面较为粗糙,呈不规则的凸起。凸起可认为是单个微胶囊沉积形成,外观无明显的空隙及分层,表明微胶囊包裹良好。此外,3种沙棘果油微胶囊凸起尺寸大小基本一致,这与光学显微镜观察到的结果相吻合。

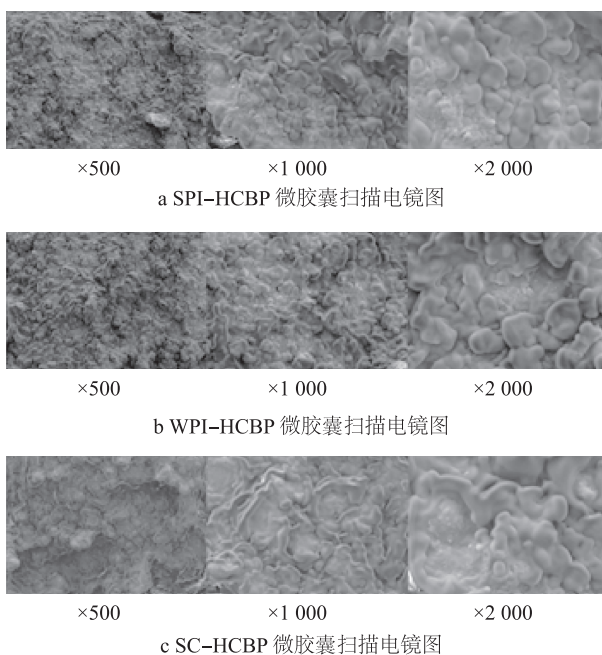


图3 3种冻干微胶囊的扫描电镜图

2.4 微胶囊收率及包埋率测定结果

3种沙棘果油微胶囊收率与包埋率对比见表2。

3种沙棘果油微胶囊收率从大到小依次为SPI-HCBP微胶囊>SC-HCBP微胶囊>WPI-HCBP微胶囊,数据分析显示,3种微胶囊收率存在显著性差异。包埋率从大到小依次为SPI-HCBP微胶囊、WPI-HCBP微胶囊、SC-HCBP微胶囊,SPI-HCBP微胶囊略高于WPI-HCBP微胶囊,两者与SC-HCBP微胶囊存在显著性差异。从收率和包埋率上看,SPI-HCBP微胶囊要好于其余2种。

表2 3种微胶囊收率与包埋率对比

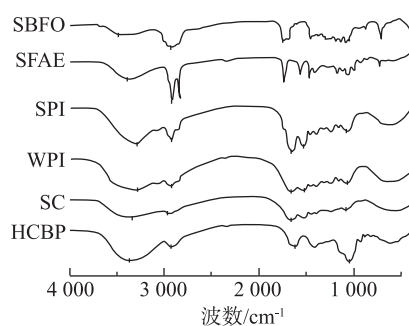
壁材选择	收率/%	包埋率/%
SPI-HCBP微胶囊	69.33 ± 0.56 ^a	71.82 ± 0.77 ^a
WPI-HCBP微胶囊	58.07 ± 1.67 ^c	71.50 ± 2.16 ^a
SC-HCBP微胶囊	63.11 ± 0.53 ^b	64.38 ± 0.50 ^b

注:同列不同小写字母表示不同样品间差异显著($P < 0.05$)。

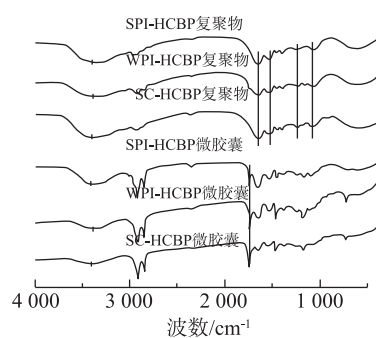
2.5 FT-IR 分析

FT-IR是表征生物大分子及其复合物结构的强有力分析手段,通过特征吸收峰能够精确解析分子中的官能团组成和化学键类型。壁材、芯材、复聚物及微胶囊的FT-IR光谱图如图4所示。HCBP在 3367 cm^{-1} 和 1630 cm^{-1} 处的吸收峰,为典型的多糖吸收峰,分别归属于羟基伸缩振动和羰基的伸缩振动。两者在复聚物中分别蓝移至 $3403\sim 3372\text{ cm}^{-1}$ 和 1650 cm^{-1} 。蛋白质N-H的伸缩振动带($3250\sim 3500\text{ cm}^{-1}$)也同样发生蓝移,如SPI的 3298 cm^{-1} 蓝移至于SPI-HCBP复聚物的 3385 cm^{-1} ;WPI的 3278 cm^{-1} 蓝移至WPI-HCBP复聚物的 3372 cm^{-1} ;SC的 3318 cm^{-1} 蓝移至SC-HCBP复聚物的 3403 cm^{-1} 。3种蛋白质的氨基吸收峰和HCBP的羟基吸收峰均出现显著蓝移现象,说明蛋白质和多糖之间不是简单的物理混合,而是蛋白质的氨基(—NH)与HCBP的羧基(—COOH)之间形成了较强的静电相互作用或者形成氢键。此外,蛋白质的特征吸收带酰胺I、酰胺II和酰胺III峰,于SPI光谱中对应 1650 、 1530 、 1238 cm^{-1} 处,于WPI光谱中对应 1649 、 1531 、 1240 cm^{-1} 处,于SC光谱中对应 1648 、 1531 、 1238 cm^{-1} 处;转移至复聚物光谱中约 1650 、 1535 、 1240 cm^{-1} 处。3种蛋白质酰胺带发生轻微位移,表明蛋白质分子中的酰胺键仅发生微弱的静电相互作用。这与Qiu等^[30]研究结果一致。

沙棘果油的主要成分是脂肪酸甘油酯类化合物,相对含量最多的脂肪酸是棕榈酸、棕榈油酸、油酸和亚油酸,所以沙棘果油呈现出油脂类物质的特征吸收峰 3460 cm^{-1} (O—H伸缩)、 2924 cm^{-1} (C—H伸缩)、 1744 cm^{-1} (酯羰基的C=O伸缩)呈强振



a 芯材及壁材红外光谱



b 复聚物及微胶囊红外光谱

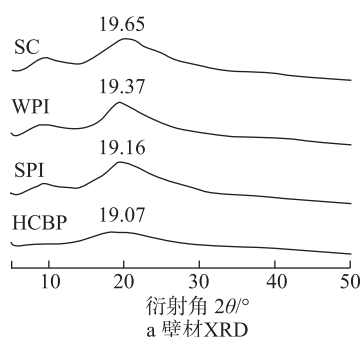
图4 壁材、芯材、复聚物及微胶囊的 FT-IR 光谱图

动模式。比较沙棘果油、3种微胶囊及3种复聚物在 3400 cm^{-1} 附近的吸收峰:沙棘果油(3460 cm^{-1})、3种沙棘果油微胶囊($3415\sim 3393\text{ cm}^{-1}$)、3种复聚物($3403\sim 3372\text{ cm}^{-1}$);3种沙棘果油微胶囊的吸收峰较沙棘果油吸收峰红移,较3种复聚物的吸收峰蓝移,可以推测微胶囊的此处的峰形是沙棘果油和复聚物此处吸收峰物理叠加的结果。此外,沙棘果油在 1744 cm^{-1} 处的特征性强吸收峰在3种微胶囊中均得以保留,峰位未发生偏移。这些结果表明,沙棘果油已成功封装在微胶囊中,并且芯材与壁材之间不发生明显的化学相互作用。

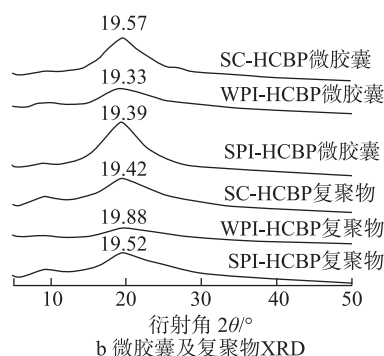
2.6 X射线衍射分析

壁材、复聚物及微胶囊的 XRD 由图 5a 可见, HCBP 及 3 种蛋白质均在 $2\theta = 20^\circ$ 附近呈现典型的宽衍射峰,这一特征表明这些生物大分子均以无定形状态存在。值得注意的是, HCBP 的衍射峰明显宽于 3 种蛋白质,说明其无定形程度更高。图 5b 显示, 3 种复聚物和 3 种微胶囊也在 $2\theta = 20^\circ$ 附近出现宽衍射峰,表明复聚物与微胶囊均保持无定形状态,但微胶囊的峰形相较于复聚物更陡峭且强度更高,表明微胶囊化过程导致体系有序度提高,可能源于壁材固化后,分子链的紧密堆积,成功形成了结构更致密的包埋体系。

XRD 图谱与 FT-IR 和 SEM 分析结论相互印



a 壁材XRD



b 微胶囊及复聚物XRD

图5 壁材、复聚物及微胶囊的 XRD 图

证,证实了沙棘果油被有效包埋在由 HCBP 与蛋白质组成的无定形微胶囊中,这种无定形结构有利于提高芯材的稳定性和生物利用度。

2.7 热重分析

3种微胶囊热重分析曲线及热重微分曲线如图 6 所示。根据图 6a 中热重分析曲线可知,在升温过程中,微胶囊的质量损失可分为 3 个阶段:温度在 $30\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 时,质量百分数变化较小,这主要是水分及挥发性物质减少导致的,说明 3 种微胶囊均具有良好的热稳定性;当温度到达 $200\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,加速失重,此时蛋白质和 HCBP 之间静电作用产生的共价键被破坏,壁材开始分解,沙棘果油因壁材分解失去保护而造成质量损失;在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,微胶囊已被碳化,质量变化较小。最终, SPI-HCBP 微胶囊质量损失为 79.58%, SC-HCBP 微胶囊为 84.07%, WPI-HCBP 微胶囊损失为 87.88%。

图 6b 热重微分曲线显示, 3 种微胶囊都形成了 2 个较陡的倒峰,经历了 2 次剧烈的分解,第 1 次发生在 $230\sim 270\text{ }^\circ\text{C}$,其中, SPI-HCBP 微胶囊的倒峰较为缓和, WPI-HCBP 微胶囊变化最为剧烈;第二次发生在 $350\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$, WPI-HCBP 微胶囊较为缓和, SPI-HCBP 微胶囊最为剧烈。因此, 3 种沙棘果油微胶囊,在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以内均具有良好的热稳定性,对芯材的保护效果较好。

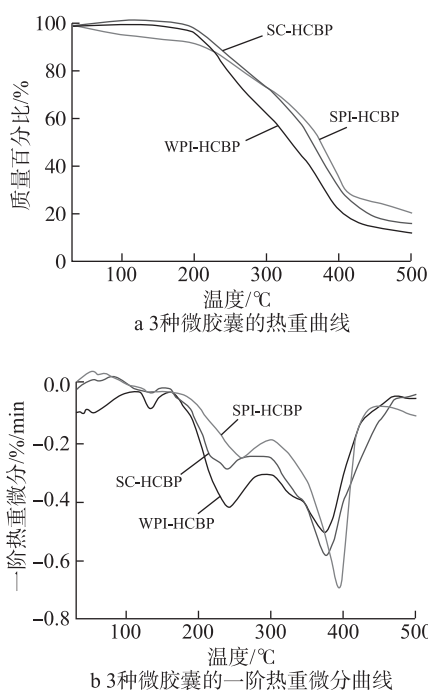


图6 3种微胶囊热重分析曲线及热重微分曲线

2.8 体外模拟胃肠液消化分析

体外模拟胃肠液消化实验是评价微胶囊生物利用度的有效研究手段。3种微胶囊体外模拟消化释放曲线如图7所示。0~2 h为模拟胃液消化阶段(SGF),此时,沙棘果油释放较缓慢。胃液消化结束时,SPI-HCBP、WPI-HCBP及SC-HCBP微胶囊的累计释放率分别为 $(19.32 \pm 0.98)\%$ 、 $(19.55 \pm 0.24)\%$ 及 $(20.89 \pm 0.73)\%$,这主要是由于蛋白质和多糖形成的致密结构抵抗了酸性环境,从而抑制沙棘果油的释放。2~8 h为模拟肠液消化阶段(SIF),在肠液环境中消化1 h后,SPI-HCBP、WPI-HCBP及SC-HCBP微胶囊的累计释放率迅速提高,分别为 $(37.44 \pm 1.28)\%$ 、 $(45.06 \pm 1.31)\%$ 和 $(49.45 \pm 1.60)\%$,表明微胶囊对胰蛋白酶更加敏感。模拟结束时,SPI-HCBP、WPI-HCBP及SC-HCBP微胶囊的累计释放率分别达到 $(73.02 \pm 1.66)\%$ 、 $(76.41 \pm 0.98)\%$ 及 $(73.91 \pm 1.59)\%$ 。

3种微胶囊在胃液中保持相对较好稳定性,而在肠液环境中表现良好释放特性。这一结果表明3种沙棘果油微胶囊可以达到肠内缓释的释放效果,大部分沙棘果油在肠液中释放,可以保护沙棘果油中的维生素E、胡萝卜素等营养成分不被胃酸破坏。同时,这一性质也表明采用黄花菜多糖作为壁材制备的微胶囊,能够较好地保护在酸性条件下易分解的活性化合物,从而提高其生物利用度。

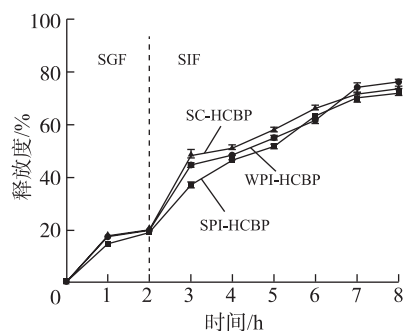


图7 3种微胶囊体外模拟消化释放曲线

3 结论

沙棘果油和黄花菜多糖均为植物来源的天然产物提取物,具有较高的营养和保健价值。本研究以黄花菜多糖作为多糖壁材,分别以大豆分离蛋白、乳清分离蛋白及酪蛋白酸钠作为蛋白壁材,通过复合凝聚法,制备沙棘果油微胶囊,并通过光学显微、SEM、FT-IR及XRD证实沙棘果油被成功包埋并且微胶囊呈无定形颗粒状,性能研究证实微胶囊具有良好的热稳定性,并且表现出胃液中相对稳定、肠液中缓释的特性。

未来可进一步聚焦黄花菜多糖包埋沙棘果油微胶囊在抗氧化等生物活性方面的研究,并探索其在固体饮料、食品添加剂、功能食品等方面的具体应用,以实现沙棘果、黄花菜的多元化与高值化利用。

参考文献

- [1]刘艺珠,刘佩冶,赵玉梅,等.黄花菜多糖的表征与抗氧化活性分析[J].食品工业科技,2022,43(12):54-61
Liu Y, Liu P, Zhao Y, et al. Characterization and antioxidant activity analysis of daylily polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12):54-61
- [2]谢鑫明,李昕蓉,李成义,等.黄花菜化学成分及药理作用研究进展[J].中成药,2024,46(10):3379-3387
Xie X, Li X, Li C, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of day lily[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(10):3379-3387
- [3]赵红霞,王应强,雷响丽,等.水提与醇提黄花菜浸膏的理化特性、化学组成与风味比较研究[J].食品与发酵工业,2025,51(12):62-73
Zhao H, Wang Y, Lei X, et al. A comparative study of physicochemical properties, chemical composition, and flavor of daylily extract by water and alcohol[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(12):62-73

- [4] 陆海勤, 宫晓丽, 李冬梅, 等. 响应面优化超声协同高压矩形脉冲电场提取黄花菜多糖工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11):163-170
Lu H, Gong X, Li D, et al. Optimization of ultrasound combined with rectangular high pulsed electrical field assisted extraction of polysaccharides from *Hemerocallis citrina* by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11):163-170
- [5] Meng Q, Chen Z, Chen F, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from *Hemerocallis citrina* and the antioxidant activity study[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(7):3082-3096
- [6] 周纪东, 李余动. 黄花菜多糖的提取、结构性质及抑菌活性[J]. 食品科学, 2015, 36(8):61-66
Zhou J, Li Y. Extraction, structural characterization and antimicrobial activity of polysaccharides from *Hemerocallis citrina* Baroni[J]. Food Science, 2015, 36(8):61-66
- [7] Sang T, Fu Y, Song L. Polysaccharides from *Hemerocallis citrina* baroni inhibit the growth of hepatocellular carcinoma cells by regulating the Wnt/ β -catenin pathway[J]. Nutrition and Cancer, 2023, 75(8):1658-1672
- [8] Ti Y, Wang W, Zhang Y, et al. Polysaccharide from *Hemerocallis citrina* Borani by subcritical water: bioactivity, purification, characterization, and anti-diabetic effects in T2DM rats[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 215:169-183
- [9] 高娟娟, 李栋, 苏丹, 等. 沙棘果油的提取工艺及其营养因子应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13):400-407
Gao J, Li D, Su D, et al. Research progress on the extraction technology of seabuckthorn fruit oil and the application of nutritional factors[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13):400-407
- [10] 杨旭升, 张宇, 张昭, 等. 中国沙棘果油和中亚沙棘果油的理化特性及活性成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(12):44-48
Yang X, Zhang Y, Zhang Z, et al. Physicochemical properties and active components in oils from *H. rhamnoides* subsp. *sinensis* and *H. rhamnoides* subsp. *Turkestanica* berry[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(12):44-48
- [11] 石佳, 于明晓, 徐昊, 等. 沙棘果油微胶囊化制备工艺的优化及其表征[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7):173-177
Shi J, Yu M, Xu H, et al. Optimization and characterization of microencapsulation technology for seabuckthorn fruit oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7):173-177
- [12] 姚翾, 陶宁萍, 王锡昌. 喷雾干燥法制取油脂微胶囊技术研究进展[J]. 现代食品科技, 2007, 23(12):85-89
Yao X, Tao N, Wang X. Progress of lipid microencapsulation by spray-drying[J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(12):85-89
- [13] 徐淑怡, 田方, 蔡路昀. 藻油DHA乳液稳态化递送体系研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6):434-444
Xu S, Tian F, Cai L. Research progress on steady state delivery system of algae oil DHA emulsion[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6):434-444
- [14] 李帅, 孙帆. 可食膜的制备及其在食品工业中的研究进展[J]. 农业科技与信息, 2023(8):145-148
Li S, Sun F. Preparation of edible film and its research progress in food industry[J]. Agricultural Science - Technology and Information, 2023(8):145-148
- [15] 杨梦, 党奇峰, 牛嗣玉, 等. 氢化阿托酸改性壳聚糖/氧化葡甘露聚糖多功能水凝胶的制备与表征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2025, 55(6):75-89
Yang M, Dang Q, Niu S, et al. Preparation and characterization of multifunctional hydrogels based on modified chitosan/oxidized glucomannan[J]. Periodical of Ocean University of China, 2025, 55(6):75-89
- [16] 赖海彬, 高静. 淀粉-大分子复合物的制备方法、相互作用和功能特性[J]. 食品科学, 2025, 46(6):285-294
Lai H, Gao J. Preparation methods, interactions and functional properties of starch-macromolecule complexes: a review[J]. Food Science, 2025, 46(6):285-294
- [17] 张磊, 关致敏, 解海, 等. 黄花多糖及其制备方法和应用: CN119656055A[P]. 2023-03-17
- [18] 刘俭, 蔡永国, 张兵, 等. 超声波辅助酶法提取沙棘果油及其体外抗氧化能力分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(10):87-94
Liu J, Cai Y, Zhang B, et al. Ultrasonic-assisted enzymatic extraction and *in vitro* antioxidant properties of seabuckthorn fruit oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(10):87-94
- [19] 郭家刚, 杨松, 伍玉菡, 等. 生姜精油微胶囊制备及其对冷鲜猪肉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2):342-352
Guo J, Yang S, Wu Y, et al. Preparation of ginger essential oil microcapsule and its effect on the quality of chilled pork[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2):342-352
- [20] 刘芬芬, 蒲首丞, 赵雯靓, 等. 枇杷花多酚微胶囊的制备工艺及特性研究[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1):208-218
Liu F, Pu S, Zhao W, et al. Studies on the preparation

- process and characteristics of loquat flower polyphenol microcapsules[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(1):208-218
- [21]朱俊玲, 梁凯, 王春艳, 等. 低共熔溶剂提取小米糠多酚及微胶囊制备[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(12):179-187
- Zhu J, Liang K, Wang C, et al. Low eutectic solvent extraction of polyphenols from millet bran and its microcapsule preparation[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(12):179-187
- [22]Adsare S R, Annapure U S. Microencapsulation of curcumin using coconut milk whey and gum Arabic[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 298:110502
- [23]Zhao M, Cao W, Li L, et al. Effects of different proteins and maltodextrin combinations as wall material on the characteristics of *Cornus officinalis* flavonoids microcapsules[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9:1007863
- [24]吴汶静, 宗爱珍, 李子松, 等. 中碳链脂肪酸甘油三酯微胶囊制备优化及性质分析[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(12):158-166
- Wu W, Zong A, Li Z, et al. Preparation process optimization and properties of medium carbon chain fatty acid triglyceride microcapsules[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(12):158-166
- [25]Lei J, Zhang H, Yan Q, et al. Improving α -amylase inhibitory activity of simulated gastrointestinal digested pea protein by pH shifting assisted proteolysis[J]. *Food Chemistry*, 2025, 467:142334
- [26]李丹, 汪秀妹, 梁杰, 等. 复合凝聚法制备槲皮素微胶囊及其表征[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(15):127-135
- Li D, Wang X, Liang J, et al. Quercetin microcapsules: preparation by complex coacervation and characterization[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(15):127-135
- [27]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 R, Shen J, Dong W, et al. Preparation of green coffee oil microcapsules by complex coacervation method and its physicochemical properties[J]. *Food Science*, 2020, 41(23):144-152
- [28]慕静怡, 胡发广, 张珍珍, 等. 不同壁材对绿咖啡油微胶囊微观结构及其热稳定性的影响[J]. *热带作物学报*, 2023, 44(3):647-660
- Mu J, Hu F, Zhang Z, et al. Effects of different wall materials on the microstructure and thermal stability of green coffee oil microcapsules[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2023, 44(3):647-660
- [29]黄俊恺. 沙棘籽油、果油品质特性及贮藏稳定性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024: 134
- [30]Qiu L, Zhang M, Adhikari B, et al. Microencapsulation of rose essential oil in mung bean protein isolate-apricot peel pectin complex coacervates and characterization of microcapsules[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124:107366.