许晓韵, 史阳凯, 张远红, 等. 金丝桃苷-大豆疏水肽基纳米复合物制备及其稳定性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 56−62. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040017

XU Xiaoyun, SHI Yangkai, ZHANG Yuanhong, et al. Fabrication and Stabilization of Hyperoside-Soybean Hydrophobic Peptide Nanocomplex[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 56−62. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040017

· 研究与探讨 ·

# 金丝桃苷-大豆疏水肽基纳米复合物制备及其稳定性

许晓韵[1], 史阳凯[1], 张远红[1], 于立梅[1,2,*]

（1.仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225;
2.广东明德升科农牧有限公司, 广东韶关 512026）

**摘　要:** 金丝桃苷（Hyperoside，HYP）具有优异的抗氧化、抗肿瘤及消炎等生物活性，但其水溶性差、生物利用度低等问题制约了其在药物开发和功能性食品领域的应用。本研究采用 pH 驱动法制备金丝桃苷-大豆疏水肽基纳米复合物（Hyperoside-loaded soybean hydrophobic peptide-based nanocomplexes，SPN-HYP），确定荷载金丝桃苷最佳浓度，并系统表征其理化性质及生物可及性。结果表明，利用大豆多肽疏水聚集体构建金丝桃苷纳米复合体系，提高了其水溶性和稳定性。纳米颗粒溶液呈黄色，包埋率达 90% 以上，荷载率为 18.88%±0.033%，粒径在 160~180 nm 之间。扫描电镜（Scanning electron microscopy，SEM）、傅里叶变换红外光谱（Fourier Transform infrared spectroscopy，FTIR）分析以及 Zeta 电位结果显示 SPN 能成功荷载 HYP；4 ℃ 贮藏 15 d 粒径变化率< 10%，模拟胃肠消化实验显示，SPN-HYP 的 HYP 生物可及性显著高于游离态（$P$<0.05），能较好保持 HYP 的抗氧化性且能提高 HYP 在肠胃消化中的稳定性以及生物可及性。因此，基于大豆疏水肽的纳米递送体系可提升金丝桃苷在功能性食品或药物开发中的应用潜力。

**关键词:** 金丝桃苷, 大豆多肽疏水聚集体, 纳米复合物, 稳定性, 生物可及性

**中图分类号:** TS255.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0056−07

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025040017　　本文网刊:

# Fabrication and Stabilization of Hyperoside-Soybean Hydrophobic Peptide Nanocomplex

**XU Xiaoyun[1], SHI Yangkai[1], ZHANG Yuanhong[1], YU Limei[1,2,*]**

（1.Zhongkai Institute of Agricultural Engineering, College of Food Science and Technology, Guangzhou 510225, China;
2.Guangdong Mingdeshengke Agriculture and Animal Husbandry Co., Ltd., Shaoguan 512026, China）

**Abstract:** Hyperoside (HYP), a flavonoid with potent antioxidant, antitumor, and anti-inflammatory activities, has limited applications in pharmaceutical development and functional foods because of its poor water solubility and low bioavailability. In this study, hyperoside-loaded soybean hydrophobic peptide-based nanocomplexes (SPN-HYP) were prepared using a pH-driven method. The optimal HYP loading concentration was determined, and the physicochemical properties and bioaccessibility of the resulting nanocomplexes were systematically characterized. The results showed that soybean peptide hydrophobic aggregates could be used to construct HYP-loaded nanocomplexes, thereby improving the water solubility and stability of HYP. The nanoparticle dispersion was yellow in appearance, with an encapsulation efficiency above 90%, a loading capacity of 18.88%±0.033%, and a particle size ranging from 160 to 180 nm. Scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and Zeta potential analysis confirmed the

**收稿日期:** 2025−04−03

**基金项目:** 广东省本科教学质量与教学改革工程项目（粤教高函【2024】9 号）; 广东省博士工作站粤人社函〔2024〕60 号; 广东省研究生示范课程建设项目（2022SFKC071）。

**作者简介:** 许晓韵（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品蛋白基复合递送体系构建与乳液稳定性评价, E-mail: 617614776@qq.com。

*** 通信作者:** 于立梅（1973−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 功能食品化学, E-mail: biyingwang2003@163.com。

successful incorporation of HYP into SPN. After storage at 4 ℃ for 15 days, the particle size variation remained below 10%. *In vitro* simulated gastrointestinal digestion showed that the bioaccessibility of HYP in the SPN-HYP system was significantly higher than that of free HYP ($P$<0.05). In addition, the SPN-HYP system effectively preserved the antioxidant activity of HYP and improved its stability and bioaccessibility during gastrointestinal digestion. Therefore, the soybean hydrophobic peptide-based nano-delivery system shows promising potential for enhancing the application of hyperoside in functional foods and pharmaceutical development.

**Key words**: hyperoside; soybean peptide hydrophobic aggregates; nanocomplexes; stability; bioaccessibility

金丝桃苷（HYP）属于黄酮醇类化合物，存在于许多植物中包括柑橘皮、山楂、苹果等植物果实[1]。它是一种极好的自由基清除剂和金属螯合剂。近年来，由于其出色的生理和药理活性，如改善心血管功能[2]、抗癌[3−4]、抗肝肾损伤[5−6]、抗炎[7] 等特有的功能活性，在食品和药品领域一直备受研究人员的关注。尽管金丝桃苷在治疗和预防人类疾病方面表现出显著的疗效和安全性，但其低水溶性和化学不稳定性导致其生物利用率极低，从而极大地限制了它们的功能特性。如何提高这些疏水性分子的水溶性和生物可及性，是食品和制药领域的研究热点。近年来，利用生物安全性载体来包封生物活性物质以提高其溶解性、稳定性和生物可及性等研究受到人们的关注[8]。

大豆蛋白是目前可用于食品加工最丰富的膳食蛋白质来源之一，由于其具有丰富的营养价值且成本较低，被广泛用于食品加工。活性肽是大豆蛋白通过生物酶解技术制备的一系列具有特定生理功能的物质[9−10]。在大豆蛋白酶解过程中，通常会发生多肽-多肽/蛋白间的疏水相互作用而聚集，生成部分不溶性的多肽聚集体（SPA），其重量可达 40%[11]，这部分多肽疏水聚集体通常被丢弃或作为动物饲料，这大大降低了大豆蛋白的工业价值，甚至可能造成环境污染。如何通过调控多肽疏水聚集体的性质来提升大豆蛋白的加工可利用性，已经成为当前蛋白及活性肽产业重点关注的研究方向。纳米载体材料在食品科学领域逐渐兴起，新型的蛋白纳米颗粒作为药物和营养物质的输送系统得到广泛应用。已有研究表明 HYP 与乳清蛋白[12]、大豆分离蛋白[13] 和 Janus 激酶[14] 等少数内源性蛋白质相互作用，这些互作的结果表明内源性生物体蛋白质能作为 HYP 的运载体和携带体。然而，关于探究 HYP 与外源性植物蛋白（大豆多肽疏水聚集体）的可能结合、包埋特性尚不清楚。本文拟选取 HYP 作为被递送对象，大豆疏水肽聚集体作为运载体，将 HYP 包封在 SPA 中形成复合物，并研究包封复合体纳米乳液的稳定性、微观结构和生物利用性。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

工业大豆多肽疏水聚集体（SPA）　广州合诚实业有限公司友情提供，为工业大豆肽（水解度约 15%）生产过程中离心得到的沉淀物直接−20 ℃ 冷冻保存而得；金丝桃苷（纯度>98%）　上海源叶生物科技有限公司；果胶（半乳糖醛酸>74%）　上海麦克林生化公司；$\alpha$-淀粉酶（131 U/mg）、胃蛋白酶（6.72 U/mg）、胰蛋白酶（1587 U/mg）、胆盐（纯度>95%）　美国 Sigma-Aldrich 公司；氢氧化钠、无水氯化钙、氯化钠、氯化镁、无水乙醇、盐酸　均为分析纯，南京化学试剂股份有限公司。

H1750R 高速台式冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；RT5 磁力搅拌器　金城国胜实验仪器厂；ST16R 离心机　美国 Thermo 公司；NanoBrook90PlusPALS 纳米粒度分析仪　布鲁克海文仪器公司；IRAffinity-1S 傅里叶红外光谱仪　岛津仪器（苏州）有限公司；UV-1780 紫外可见分光光度计　岛津企业管理有限公司；蔡司 sigma 300 扫描电镜　德国蔡司公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　大豆肽基纳米颗粒制备　准确称取 0.1 g SPA，溶于 10 mL 超纯水中，室温条件下 600 r/min 磁力搅拌 5 min，获得质量浓度为 10 mg/mL SPA 分散液；再采用 1.0 mol/L NaOH 溶液将 SPA 分散液 pH 调节至 pH12.0，室温静置平衡 1 h；最后使用 1.0 mol/L HCl 将混合液中和到 pH7.0，于 20 ℃ 下，8000 r/min 离心 15 min，弃去上清液，连续离心两次，所得沉淀即为大豆肽基纳米颗粒（Soy peptide-based nanoparticles, SPN）[15]。

1.2.2　金丝桃苷-大豆疏水肽基纳米复合物（SPN-HYP）制备　采用 pH 驱动法制备[16]。准确称取 0.1 g SPA，加入 10 mL 超纯水，室温条件下磁力 600 r/min 下搅拌 5 min，获得质量浓度为 10 mg/mL SPA 分散液；使用 1.0 mol/L NaOH 将 SPA 分散液 pH 调节至 12.0，平衡 1 h；分别将 10、20、30、40 mg 的 HYP 标准品粉末缓慢加入至分散液中，在 600 r/min 室温条件下磁力搅拌 30 min，使用 1.0 mol/L HCl 和 1.0 mol/L NaOH 将混合液中和到 pH7.0，在 8000 r/min，20 ℃下离心 15 min，连续离心两次，以 HYP 的浓度将样品记为 1、2、3、4 mg/mL 的 SPN-HYP。在 4 ℃ 冰箱储藏用于后续测定。

1.2.3　大豆肽基纳米颗粒（SPN）对金丝桃苷（HYP）的荷载率和包埋率的测定　精准配制浓度为 0、3、6、9、12、15 μg/mL 的 HYP，使用紫外可见分光光度计，在波长 360 nm 处测定 HYP 标准曲线，得标准曲

线为 y=0.0384x+0.0202, $R^2$=0.9928。

金丝桃苷荷载率和包埋率的测定参照杜田娇[12]的方法, 稍作修改。取 1.2.2 离心后的沉淀物用 95% 乙醇溶解后转入离心管, 8000 r/min、20 ℃ 条件离心 15 min, 取其上清液, 避光静置 15 min, 在 360 nm 波长处, 用紫外分光光度计测定吸光值, 代入 HYP 标准曲线, 计算对应的 HYP 的质量, 使用以下公式计算 HYP 包埋率(EE, %)和荷载率(LA, %):

$$EE(\%) = \frac{1-F}{T} \times 100 \quad \text{式（1）}$$

$$LA(\%) = \frac{1-F}{S} \times 100 \quad \text{式（2）}$$

式中: T 表示总金丝桃苷含量, μg; F 表示沉淀中金丝桃苷含量, μg; S 表示复合颗粒中肽基纳米颗粒的质量, mg。

1.2.4 复合物的粒径(Dz)、多分散系数(PDI)和 Zeta 电位的测定 使用 pH7.0 的去离子水将 SPN-HYP 颗粒分散液稀释 10 倍后, 粒径及其分布、PDI、Zeta-电位采用 Zeta 电位及粒度分析仪在 25 ℃ 进行测定[17]。

1.2.5 扫描电镜(SEM) 将冻干后的 SPN、HYP 和 SPN-HYP 均匀地黏附于导电胶上, 喷金镀膜, 安装于铝柱上, 采用蔡司 sigma 300 扫描电镜观察其微观结构。

1.2.6 傅里叶红外光谱(FTIR)分析 分别取适量的 HYP、SPN、SPN-HYP 的冻干粉, 用溴化钾压片, 在 400~4000 $cm^{-1}$ 波数下使用红外光谱扫描检测。

1.2.7 贮藏稳定性 通过纳米粒径变化与观察贮藏期间外观图片来评价 SPN-HYP 的贮藏稳定性, 参考 1.2.3 的方法测定 SPN-HYP 的包埋率来确定荷载 HYP 的纳米颗粒的化学稳定性。

1.2.8 DPPH 自由基清除能力测定方法 参考白莉等[18]的方法, 将 200 μL 游离 HYP 或 SPN-HYP 溶液与 2.8 mL 0.1 mol/L DPPH 乙醇溶液 25 ℃ 下避光反应 30 min, 于 517 nm 测定吸光度, 用以下公式计算 DPPH 自由基清除率。

$$DPPH清除率(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式（3）}$$

式中: $A_0$: DPPH 溶液+乙醇的吸光度; $A_1$: DPPH 溶液+样品溶液的吸光度; $A_2$: 样品溶液+乙醇的吸光度。

1.2.9 体外模拟消化实验 参考 Zhang 等[11]的方法, 游离的 HYP 及 SPN-HYP 的稳定性和生物可及性采用模拟胃肠消化两步法测定。将游离 HYP 及 SPN-HYP 分散液与模拟胃液按 1∶1 体积比混合, 在 37 ℃, 100 r/min 条件下振荡消化 2 h; 调节 pH 至 7.0 后加入模拟肠液继续消化 4 h, 消化过程中每 1 h 取样, 离心后测定 HYP 含量计算生物可及性, 以 HYP 保留率评价稳定性。样品在不同消化阶段的稳定性和生物可及性分别按下式计算:

$$稳定性(\%) = C_t/C_0 \times 100 \quad \text{式（4）}$$

$$生物可及性(\%) = C_0/C_m \times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中, $C_t$ 为胃消化阶段或胃肠联合消化阶段总消化相中 HYP 含量; $C_0$ 为消化前样品中 HYP 的初始含量; $C_m$ 为胃肠联合消化结束后胶束相中 HYP 的含量。

### 1.3 数据处理

每个试验均重复三次。数据采用平均值±标准偏差(AV±SD)表示。应用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差和皮尔森相关性分析, 采用 Origin 2021 软件作图。$P$<0.05 表示显著, $P$<0.01 表示极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 金丝桃苷-大豆疏水肽聚集体-果胶纳米复合体系的表征

2.1.1 大豆肽基纳米颗粒(SPN)对金丝桃苷(HYP)的荷载量和包埋率 图 1、图 2 是 SPA 分散液浓度为 10 mg/mL 制备的复合纳米颗粒中不同浓度的金丝桃苷的荷载率和包埋率。游离的金丝桃苷水溶性较差, 经 pH-shifting 处理形成的负载金丝桃苷的 SPN 纳米颗粒显示出具有明显改善溶解性的作用。随着金丝桃苷浓度的增加, EE 呈现显著下降趋势($P$<0.05), 从 96.12%±0.075% 降低至 83.58%±0.085%,

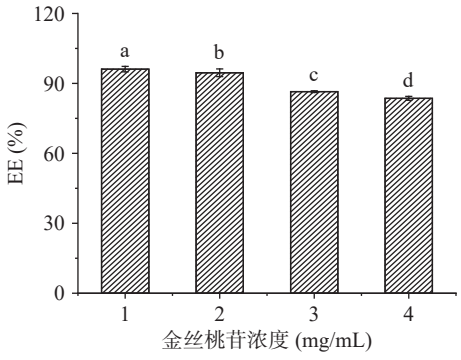



图 1 SPN-HYP 复合纳米颗粒包埋率

Fig.1 Embedding rate of SPN-HYP composite nanoparticles

注: 不同字母表示组间差异显著($P$<0.05), 图 2、图 6~图 9 同。

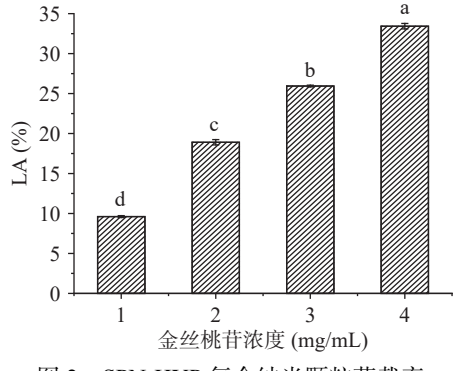



图 2 SPN-HYP 复合纳米颗粒荷载率

Fig.2 Loading capacity of SPN-HYP composite nanoparticles

而 LA 则显著上升($P$<0.05)，由 9.61%±0.012% 增加到 33.43%±0.034%，2 mg/mL 的荷载率为 18.88%±0.033%，相当于每毫克纳米颗粒中荷载 188.80 μg HYP。通过观察发现，金丝桃苷浓度为 3、4 mg/mL 时纳米颗粒不稳定，24 h 后有沉淀析出，这可能是由于纳米颗粒荷载金丝桃苷具有饱和性，而不是芯材物质的添加量越多，包埋率越高，这与杜田娇[12]研究结果相似。并且金丝桃苷成本较高，说明适合的金丝桃苷添加量能够兼顾包埋率、荷载率及经济成本方面，因此综合考虑采用金丝桃苷浓度为 2 mg/mL 的复合纳米颗粒进行后续指标分析测定。

对比其他报道可得，本研究所制备的纳米颗粒具有较高 EE、LA。刘艳菊等[19]制备的金丝桃苷磷脂酰胆碱/壳聚糖自组装纳米粒，包埋率和荷载率分别为 84.19% 和 8.81%，但其在制备过程中采用了有机溶剂乙醇。张艳慧等[20]制备的金丝桃苷纳米结构脂质载体包封率可达 89.92%，但载药量仅为 3.37%。本研究的 SPN-HYP 体系在避免有机溶剂的同时，获得了较高的包封率和载药量，为金丝桃苷的递送体系提供了一种可行的新方法。

2.1.2　复合物的 Dz、PDI 和 Zeta 电位　由图 3 可知，荷载金丝桃苷的纳米颗粒粒径分布较集中，其粒径和 Zeta 电位数据详见表 1。SPN 的粒径为 169.03±5.85 nm，荷载金丝桃苷后的 SPN 粒径略有变化，逐渐增加，这可能是由于 SPN与金丝桃苷的疏水相互作用或氢键作用力所致，当荷载的金丝桃苷浓度为 4 mg/mL 时粒径为 193.11±7.73 nm，粒径变化较显著($P$<0.05)。Zeta 电位通常用于测量粒子的有效表面电荷，并提供单个粒子之间静电相互作用的信息，高 Zeta 电位通常被认为通过静电斥力阻止粒子聚集，从而稳定胶体分散[21]，纳米颗粒的 Zeta 电位的绝对值大于 30 mV 时，纳米颗粒处于较稳定状态[22]，从本研究的实验数据看，单独的 SPN 与荷载金丝桃苷浓度 1 mg/mL 和 2 mg/mL 的 SPN Zeta 电位差异不显著($P$>0.05)，约为 24 mV，随着金丝桃苷的浓度增大到 4 mg/mL，Zeta 电位绝对值逐渐降低，同时粒径增大，说明此时 SPN 包埋具有饱和性，过高的金丝桃苷添加量可能导致纳米颗粒稳定性下降。此外，复合物的 PDI 值均低于 0.3，说明体系分布均一[23]。因此，HYP 浓度≤3 mg/mL 时可以维持体系的稳定性。

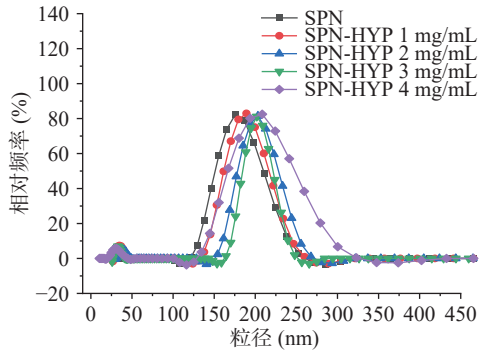



图 3　SPN-HYP 复合纳米颗粒粒径分布图

Fig.3　Size distribution of SPN-HYP composite nanoparticles

表 1　SPN-HYP 复合纳米颗粒粒径及电位

Table 1　Size and potential of SPN-HYP composite nanoparticles

| 样品 | 粒径(nm) | 电位(mV) | PDI |
|---|---|---|---|
| SPN | 169.03±5.85$^{c}$ | −23.52±0.78$^{b}$ | 0.23±0.03$^{a}$ |
| 1 mg/mL | 173.98±3.64$^{b}$ | −24.45±0.78$^{b}$ | 0.25±0.02$^{a}$ |
| 2 mg/mL | 174.92±3.99$^{b}$ | −23.78±0.7$^{b}$ | 0.24±0.02$^{a}$ |
| 3 mg/mL | 175.89±1.15$^{b}$ | −22.27±1.64$^{b}$ | 0.25±0.02$^{a}$ |
| 4 mg/mL | 193.11±7.73$^{a}$ | −19.81±1.50$^{a}$ | 0.24±0.02$^{a}$ |

注：同列数据上标不同小写字母表示组间差异显著($P$<0.05)。

2.1.3　扫描电子显微镜(SEM)评估 SPN-HYP 复合纳米颗粒的微观结构　通过观察 HYP、SPN、2 mg/mL SPN-HYP 复合物的微观形貌来了解复合纳米颗粒的微观结构，如图 4。游离金丝桃苷(HYP)聚集成大的片状结构，这是由于游离的 HYP 几乎不溶于水，以聚集体形式存在；冷冻干燥后的 SPN 结构上呈颗粒状，这主要是因为 pH 驱动使不溶性聚集体发生了结构解离和重组装[24]，SPA 形成了粒径较小且分布比较均匀的大豆肽基纳米颗粒(SPN)，与 Pan 等[25]研究蛋白纳米颗粒结果相似；荷载金丝桃苷的 SPN 颗粒形状与 SPN 相似，呈现颗粒状，但不规则体较多，颗粒有块状的结构，可能是冷冻干燥的影响，与李雪琪[26]研究负载姜黄素的乳铁蛋白-EGCG-透明质酸纳米颗粒结果相似；复合纳米颗粒粒径增大与粒径测定结果一致。

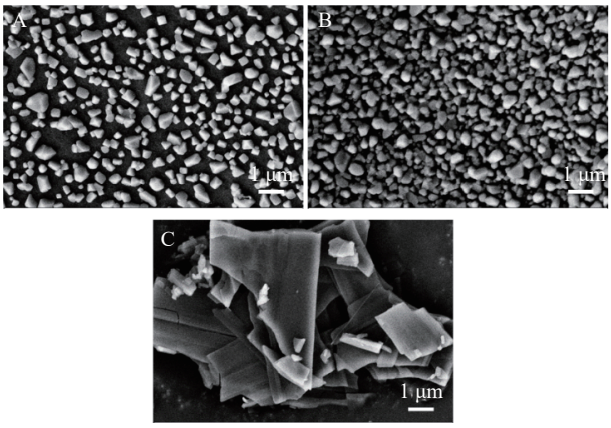



图 4　SPN-HYP 复合纳米颗粒的扫描电子显微镜结果

Fig.4　Scanning electron microscope (SEM) results of SPN-HYP composite nanoparticles

注：A、B、C 分别为 SPN-HYP、SPN、HYP。

2.1.4　复合物的红外光谱(FTIR)分析　图 5 为 FTIR 观测的 2 mg/mL SPN-HYP 纳米颗粒、HYP 和 SPN 纳米颗粒的相互作用力图。金丝桃苷在 3447 cm$^{-1}$ 处可能是芳烃中的 C-伸缩振动吸收峰，1344、1592 cm$^{-1}$ 处可能是金丝桃苷中苯环的 C=C，伸缩振动吸收峰[12]。SPN、SPN-HYP 纳米颗粒在峰 1344 cm$^{-1}$ 没有明显相似的特征峰，与原始 SPN 相

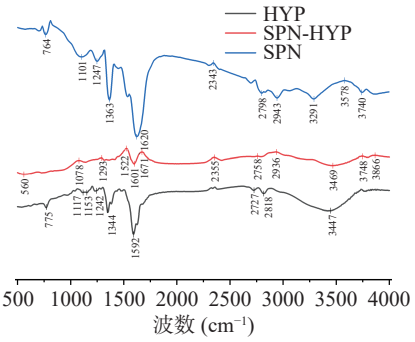



图 5 SPN-HYP 复合纳米颗粒的 FTIR 结果

Fig.5 FTIR result of SPN-HYP composite nanoparticles

比，SPN-HYP 的红外吸收谱图在 1522、1601、2355 $cm^{-1}$ 处出现了新的吸收峰，且 SPN-HYP 的红外光谱图与 SPN 的出峰趋势相似；在 1000~2000 $cm^{-1}$ 间，SPN-HYP 为 SPN 的峰轻微移动。SPN-HYP 的峰与 HYP 的峰趋势不相同，复合物在 3400 $cm^{-1}$ 附近的羟基吸收带也相较 SPN 变强变宽，并伴随 5~8 $cm^{-1}$ 的红移，这些特征变化说明了复合物体系中的分子间或分子内氢键缔合作用可能增强，形成了新的分子间氢键网络[27]。以上变化说明 HYP 通过氢键相互作用成功负载于 SPN 纳米颗粒表面，结合扫描电镜结果中 SPN-HYP 颗粒形状与 SPN 颗粒相似的现象，说明 HYP 荷载在 SPN 上。

## 2.2 SPN-HYP 复合纳米颗粒贮藏稳定性

本文对纳米复合物的贮藏稳定性进行了研究，图 6A~图 6C 为 SPN-HYP 纳米颗粒在 4 ℃ 条件下储藏 15 d 的变化情况。如图可以看出 SPN-HYP 纳米颗粒 15 d 内呈较澄清的黄色液体，没有沉淀析出，说明 SPN 荷载 HYP 可以较好地提高金丝桃苷的溶解度。15 d 内，SPN 荷载 HYP 的包埋率轻微下降，15 d SPN-HYP 包埋率仍然达到 86.29%±0.47%，且粒径变化较小，说明 SPN 对 HYP 的荷载效果较好。同时，SPA 通过疏水作用包裹 HYP，且 2.1.4 中表面复合物分子间存在氢键相互作用，使得 SPN-HYP 纳米颗粒较稳定。在 Han 等[28] 的研究中，以甲氧基聚乙二醇-b-聚(ε-己内酯)和金丝桃素为原料，采用改进的溶剂蒸发法制备纳米颗粒，经过 30 d 的储存，Hyp-NP 中保留了 91.4% 的金丝桃素，水动力大小几乎没有变化，相比，SPN-HYP 表现出更优异的稳定性。

## 2.3 SPN-HYP 复合纳米颗粒抗氧化活性

图 7 是游离的 HYP 与 SPN-HYP 抗氧化能力测定结果。SPN-HYP 与游离的 HYP 的抗氧化能力非常接近，这种活性保留可能归功于 DPPH 自由基清除活性的反应介质，反应发生在乙醇体系，游离的 HYP 易溶于乙醇，SPN-HYP 在乙醇中也会释放出来[29]，使得两种形态的 HYP 在 DPPH 自由基清除反应中实际参与反应的有效浓度基本一致。表明游离 HYP 被荷载后不会影响本身的抗氧化活性。该结果不仅验证了 SPN 作为 HYP 载体的生物相容性，更揭示了其“即溶即释”的可控释放特性。

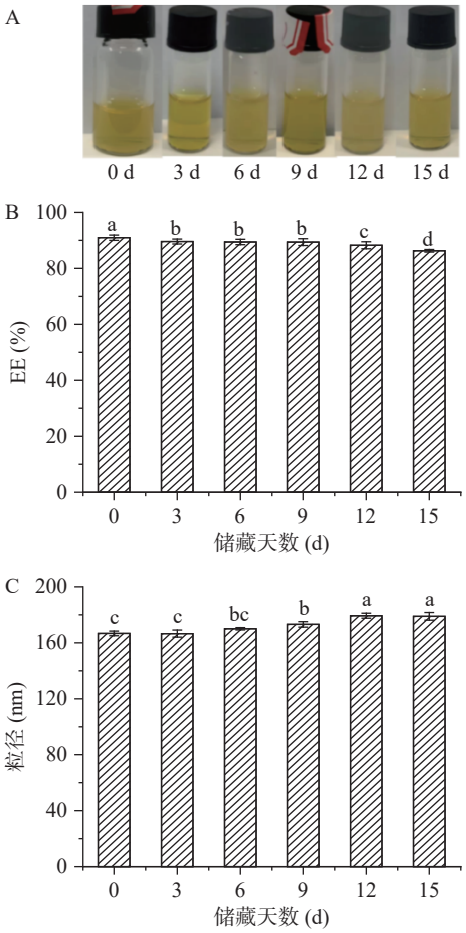



图 6 SPN-HYP 复合纳米颗粒贮藏稳定性结果

Fig.6 Storage stability results of SPN-HYP composite nanoparticles

注：A. 贮藏期的溶液状态；B. 贮藏期的包埋率；C. 贮藏期的粒径。

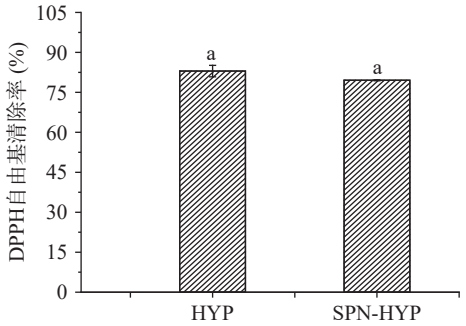



图 7 游离金丝桃苷与 SPN-HYP 的抗氧化能力

Fig.7 Antioxidant capacity of HYP and SPN-HYP

## 2.4 SPN-HYP 复合纳米颗粒体外模拟消化稳定性和生物可及性

通过体外模拟消化试验评价了 SPN-HYP 复合纳米颗粒的消化稳定性和生物可及性(图 8、图 9)。数据显示，胃环境下 HYP 包埋体系(SPN-HYP)的稳定性显著优于肠环境($P$<0.05)，相比游离的 HYP，SPN-HYP 纳米颗粒在胃肠阶段均表现出更优稳定性，在胃消化阶段和胃肠联合消化阶段分别约为游离态的 1.2 倍和 1.3 倍($P$<0.05)，可能是因为 SPN

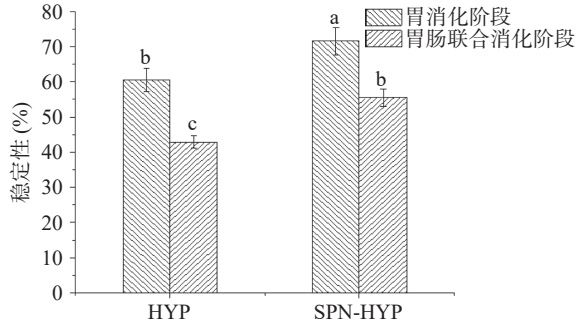



图 8　SPN-HYP 在肠胃模拟消化的稳定性

Fig.8　Stability of SPN-HYP particle size to simulate digestion in the gastrointestinal tract

载体对 HYP 荷载，以及二者的氢键或静电相互作用对 HYP 起到了一定的保护作用。肠胃消化过程，保留或转移在水相的 HYP 被认为是生物可及的，易于被肠胃吸收利用部分。通过图 9 可以看出，SPN-HYP 纳米颗粒在胃、肠阶段转移入水相中的 HYP 比游离金丝桃苷多，提升 142.7%（胃）和 30.9%（肠），表明 HYP 荷载在 SPN 后可以提高其生物利用率；在肠消化中游离的金丝桃苷转移入水中的含量明显比在胃中提高，生物可及性增加，这与肠道弱碱性环境促进苷类物质溶出的特性一致[30]。该结果与唐岚[13] 的研究形成互证，该团队构建了大豆分离蛋白和大豆可溶性多糖包埋金丝桃苷制备的三元复合物，在 pH3.5 模拟胃液条件下，HYP 释放率仅为 21.57%。分析原因为阴离子多糖与蛋白质的静电络合对抑制蛋白聚集或体内消化具有抵抗力，可作为小分子的保护屏。

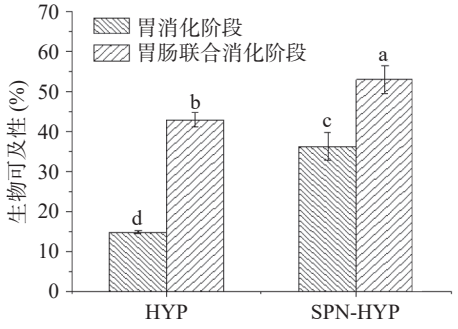



图 9　SPN-HYP 在肠胃模拟消化的生物可及性

Fig.9　Bioaccessibility of SPN-HYP particle size to simulate digestion in the gastrointestinal tract

## 3　结论

大豆肽基纳米颗粒可成功荷载橙子果皮检出的主要黄酮类物质-金丝桃苷，形成 SPN-HYP 复合纳米颗粒，实现黄酮类活性成分的高效负载与活性提升。SPN-HYP 复合纳米颗粒为溶液状态，呈黄色，包埋率为 90% 以上，荷载率 18.88%±0.033%，粒径为 160~180 nm。SPN-HYP 复合纳米颗粒于 4 ℃ 条件下贮藏 15 d，粒径、包埋率及溶液状态表现较好，且 SPN-HYP 复合纳米颗粒可以明显地提高金丝桃苷的水溶性和生物可及性。但本论文还存在不足，在此对今后的研究方向提出展望：大豆肽疏水聚集体构建主要黄酮纳米颗粒，对金丝桃苷荷载量具有一个饱和度，且复合纳米颗粒溶液保质期也比较短，容易发霉变质，因此提高大豆肽基-金丝桃苷复合纳米颗粒的保质期及荷载量可能成为下一步的研究方向。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献

[1] PATEL K, KUMAR V, RAHMAN M, et al. New insights into the medicinal importance, physiological functions and bioanalytical aspects of an important bioactive compound of foods ‘Hyperin’: Health benefits of the past, the present, the future[J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2018, 7(1): 31−42.

[2] FERENCZYOVA K, KALOCAYOVA B, BARTEKOVA M. Potential implications of quercetin and its derivatives in cardioprotection[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(5): 1585.

[3] CHEN Dan, WU Yaxian, QIU Yubao, et al. Hyperoside suppresses hypoxia-induced A549 survival and proliferation through ferrous accumulation via AMPK/HO-1 axis[J]. Phytomedicine, 2020, 67: 153138.

[4] HU Zhiyuan, ZHAO Pengjun, XU Huifang. Hyperoside exhibits anticancer activity in non-small cell lung cancer cells with T790M mutations by upregulating FoxO1 via CCAT1[J]. Oncology Reports, 2020, 43(2): 617−624.

[5] XING Haiyan, FU Ruoqiu, CHENG Caiyi, et al. Hyperoside protected against oxidative stress-induced liver injury via the PHLPP2-AKT-GSK-3$\beta$ signaling pathway *in vivo* and *in vitro*[J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 1065.

[6] 巩春智. 金丝桃苷对脂多糖所致小鼠急性肾损伤的保护作用及其机制研究[D]. 济南：山东大学, 2019. [GONG Chunzhi. Protective effect of hyperoside on LPS-induced acute kidney injury and the underlying mechanisms[D]. Jinan: Shandong University, 2019.]

[7] SUN Kai, LUO Jiahui, JING Xingzhi, et al. Hyperoside ameliorates the progression of osteoarthritis: An *in vitro* and *in vivo* study[J]. Phytomedicine, 2021, 80: 153387.

[8] XIONG Ke, ZHOU Liyang, WANG Jinyu, et al. Construction of food-grade pH-sensitive nanoparticles for delivering functional food ingredients[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 102−113.

[9] WU Jianping, DING Xiaolin. Characterization of inhibition and stability of soy-protein-derived angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides[J]. Food Research International, 2002, 35(4): 367−375.

[10] WANG W Y, de MEJIA E G. A new frontier in soy bioactive peptides that may prevent age-related chronic diseases[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2005, 4(4): 63−78.

[11] ZHANG Yuanhong, ZHOU Feibai, ZHAO Mouming, et al. Soy peptide aggregates formed during hydrolysis reduced protein extraction without decreasing their nutritional value[J]. Food & Function, 2017, 8(12): 4384−4395.

［12］ 杜田娇. 刺玫果黄酮对 α-葡萄糖苷酶的抑制及其纳米颗粒的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. ［DU Tianjiao. Inhibition of α-glucosidase by *Rosa davurica* pall. flavonoids and the study of its nanoparticles[D]. Changchun: Jilin University, 2023. ］

［13］ 唐岚. 大豆分离蛋白与金丝桃苷的相互作用研究及三元聚集体纳米颗粒的制备[D]. 成都: 成都大学, 2022. ［TANG Lan. The binding mechanism of hyperoside to soybean protein isolated and it's preparation of ternary polymer nanoparticles[D]. Chengdu: Chengdu University, 2022. ］

［14］ DELLAFIORA L, GALAVERNA G, CRUCIANI G, et al. On the mechanism of action of anti-inflammatory activity of hypericin: An *in silico* study pointing to the relevance of Janus kinases inhibition[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3058.

［15］ 张远红. 大豆肽基纳米颗粒的制备、界面行为及功能性输送的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. ［ZHANG Yuanhong. Fabrication, interfacial behaviors and functional delivery of soy peptide-based nanoparticles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. ］

［16］ ZI Ye, SHI Cuiping, KAN Guangyi, et al. Two types of pH-responsive genipin-crosslinked gelatin conjugates with high surface hydrophobicity for emulsion stabilization[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109718.

［17］ FAN Jiaxuan, GUO Xiaona, ZHU Kexue. Impact of laccase-induced protein cross-linking on the *in vitro* starch digestion of black highland barley noodles[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107298.

［18］ 白莉, 吴颖娴, 董浩, 等. 23 个品种柑橘果皮黄酮类含量及抗氧化活性比对研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(19): 133−142. ［BAI Li, WU Yingxian, DONG Hao, et al. Comparative study on flavonoids content and antioxidant activity of 23 kinds of *Citrus reticulata* Blanco peels[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(19): 133−142. ］

［19］ 刘艳菊, 武月丹, 位小杰, 等. 包载金丝桃苷的磷脂酰胆碱/壳聚糖自组装纳米粒的制备、表征及其口服药动学研究[J]. 中草药, 2025, 56(3): 819−830. ［LIU Yanju, WU Yuedan, WEI Xiaojie, et al. Self-assembled phosphatidylcholine/chitosan nanoparticles loaded with hyperoside: Preparation, characterization and oral pharmacokinetics[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2025, 56(3): 819−830. ］

［20］ 张艳慧, 董亚娜, 谈秀凤. 金丝桃苷纳米结构脂质载体制备及其体内药动学研究[J]. 中成药, 2023, 45(10): 3382−3386. ［ZHANG Yanhui, DONG Yana, TAN Xiufeng. Preparation of hyperin nanostructured lipid carrier and its pharmacokinetics *in vivo*[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(10): 3382−3386. ］

［21］ LI J H, ZHAI J L, DYETT B, et al. Effect of gum Arabic or sodium alginate incorporation on the physicochemical and curcumin retention properties of liposomes[J]. LWT, 2021, 139: 110571.

［22］ 彭茜. 黄酮化合物对 α-葡萄糖苷酶的抑制及其包埋物纳米颗粒的理化性质与生物活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016. ［PENG Qian. The inhibition mechanism of flavonoids on α-glucosidase and the physicochemical property and bioactivity of flavonoids binding with nanoparticles[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. ］

［23］ LIU Gang, WANG Qi, HU Zhongze, et al. Maillard-reacted whey protein isolates and epigallocatechin gallate complex enhance the thermal stability of the Pickering emulsion delivery of curcumin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(18): 5212−5220.

［24］ RUSS N, ZIELBAUER B I, GHEBREMEDHIN M, et al. Pre-gelatinized tapioca starch and its mixtures with xanthan gum and ι-carrageenan[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 56: 180−188.

［25］ PAN Kang, ZHONG Qixin. Low energy, organic solvent-free co-assembly of zein and caseinate to prepare stable dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 600−606.

［26］ 李雪琪. 乳铁蛋白-EGCG-透明质酸纳米颗粒构建及其递送姜黄素的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. ［LI Xueqi. Construction of lactoferrin-EGCG-hyaluronic acid nanoparticles and its application for curcumin delivery[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022. ］

［27］ 姬雨雪, 郑丽丽, 杨旸, 等. β-乳球蛋白多酚三配体复合物纳米颗粒的制备与表征[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 18−26. ［JI Yuxue, ZHENG Lili, YANG Yang, et al. Preparation and characterization of β-lactoglobulin nanoparticles loaded with three polyphenols[J]. Food Science, 2022, 43(2): 18−26. ］

［28］ HAN X J, TARATULA O, TARATULA O, et al. Biodegradable hypericin-containing nanoparticles for necrosis targeting and fluorescence imaging[J]. Molecular Pharmaceutics, 2020, 17(5): 1538−1545.

［29］ OCHIAI M, TEZUKA K, YOSHIDA H, et al. Edible insect *Locusta migratoria* shows intestinal protein digestibility and improves plasma and hepatic lipid metabolism in male rats[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133701.

［30］ MAO Xuejin, XIAO Weiming, WAN Yiqun, et al. Dispersive solid-phase extraction using microporous metal-organic framework UiO-66: Improving the matrix compounds removal for assaying pesticide residues in organic and conventional vegetables[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128807.