张馨笛, 王崑仑, 朱玲, 等. 西洋参纳米颗粒的制备、表征及体外活性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 169−180. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080081

ZHANG Xindi, WANG Kunlun, ZHU Ling, et al. Preparation, Characterization, and *in Vitro* Activity of American Ginseng Nanoparticles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 169−180. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080081

· 研究与探讨 ·

西洋参纳米颗粒的制备、表征及体外活性研究

张馨笛[1,2], 王崑仑[1,2], 朱　玲[1,2], 韩亚希[1,2], 陈　晴[1,2], 季妮娜[3], 姚鑫淼[1,2], 周　野[1,2], 管立军[1,2,*]

（1.黑龙江省农业科学院食品加工研究所, 黑龙江哈尔滨 150086;
2.黑龙江省食品加工重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150086;
3.黑龙江省农业科学院大豆研究所, 黑龙江哈尔滨 150086）

摘　要: 本研究采用反溶剂沉淀法制备西洋参皂苷/黄酮/多糖/大豆分离蛋白纳米颗粒（AG Nps）。利用响应面法优化 AG Nps 的制备工艺，并对 AG Nps 进行粒径分析、Zeta 电位测定、傅里叶变换红外光谱分析、差示扫描量热分析和热重分析，最后对 AG Nps 的体外抗氧化、降血脂和降血糖活性进行评价。结果表明，AG Nps 的最佳制备条件为反溶剂相浓度 16 mg/mL、溶剂相浓度 15 mg/mL，体积比 39∶1，此条件下 AG Nps 的包封率为 90.14%±1.03%，载药量为 1.11%±0.07%。该纳米颗粒的平均粒径为 318.60±5.60 nm，且分布均匀，Zeta 电位为−33.05±0.50 mV。纳米颗粒的热稳定性提高，并且具有良好的抗氧化能力。AG Nps 对胰脂肪酶和胆固醇胶束活性的半抑制质量浓度（IC_{50}）分别为 7.29 mg/mL 和 6.32 mg/mL，说明它对胰脂肪酶和胆固醇胶束有一定抑制作用，并且具有较好的胆酸盐结合能力。AG Nps 对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制活性显著增加（$P<0.05$），IC_{50} 值分别为 3.21 mg/mL 和 5.33 mg/mL，综上，AG Nps 具有较好的体外降血脂降血糖活性，本研究为西洋参功能性产品的开发提供理论支持与技术参考。

关键词: 西洋参, 纳米颗粒, 皂苷, 大豆分离蛋白, 体外抗氧化活性, 体外降血脂活性, 体外降血糖活性
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0169−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080081　　本文网刊:

Preparation, Characterization, and *in Vitro* Activity of American Ginseng Nanoparticles

ZHANG Xindi[1,2], WANG Kunlun[1,2], ZHU Ling[1,2], HAN Yaxi[1,2], CHEN Qing[1,2], JI Nina[3], YAO Xinmiao[1,2], ZHOU Ye[1,2], GUAN Lijun[1,2,*]

（1.Food Processing Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China;
2.Heilongjiang Province Key Laboratory of Food Processing, Harbin 150086, China;
3.Soybean Research Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China）

Abstract: This study prepared American ginseng saponins/flavonoids/polysaccharides/soy protein isolate nanoparticles (AG Nps) by the reverse solvent precipitation method. The response surface method was used to optimize the preparation process of AG Nps. The particle size analysis, Zeta potential determination, Fourier transform infrared spectroscopy analysis, differential scanning calorimetry analysis and thermogravimetric analysis of AG Nps were carried out. The *in vitro* antioxidant, hypolipidemic, and hypoglycemic activities of AG Nps were evaluated. The results indicated that the optimum conditions for the preparation of AG Nps were reverse solvent phase concentration 16 mg/mL, solvent phase concentration 15 mg/mL, volume ratio 39∶1. The encapsulation efficiency of AG Nps under these conditions was 90.14%±1.03%, and

收稿日期: 2025−08−11
基金项目: 黑龙江省农业科学院农业科技创新项目（CX25GG02）; 中央引导地方科技发展专项现代农业省实验室项目资助（ZY04JD05-012）。
作者简介: 张馨笛（1997−）, 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 食药同源食品加工, E-mail: zhangxindi97@163.com。
*** 通信作者:** 管立军（1983−）, 男, 博士, 正高级研究员, 研究方向: 食药同源食品加工, E-mail: qqaipphh@sina.com。

drug loading was 1.11%±0.07%. The average particle size was 318.60±5.60 nm with uniform distribution, and Zeta potential was −33.05±0.50 mV. The thermostability and antioxidant capacity of nanoparticles improved. The half-inhibitory concentration (IC_{50}) of pancreatic lipase and cholesterol micelles was 7.29 mg/mL and 6.32 mg/mL respectively, indicating that AG Nps had certain inhibitory effects on pancreatic lipase and cholesterol micelles and better cholate binding abilities. The inhibitory activities of α-glucosidase and α-amylase significantly increased (P<0.05), with IC_{50} values of 3.21 mg/mL and 5.33 mg/mL respectively. In conclusion, AG Nps possess great *in vitro* hypolipidemic and hypoglycemic activities. These findings provide valuable theoretical and technical insights for the development of functional products of American ginseng.

Key words: American ginseng; nanoparticles; saponin; soy protein isolate; *in vitro* antioxidant activity; *in vitro* hypolipidemic activity; *in vitro* hypoglycemic activity

西洋参(American ginseng, AG)作为一种珍贵的食药同源植物,富含皂苷、黄酮、多糖等多种活性成分。现代药理学研究证实,其具有抗氧化、调节免疫、降血脂及降血糖等多种生理功能,在预防与改善慢性代谢性疾病方面展现出广阔的应用前景[1−3]。目前已从西洋参中分离出了 100 多种人参皂苷类成分,研究表明西洋参皂苷可以通过调节 MAPK 通路的关键下游靶点改善慢性心力衰竭[4−5]。西洋参多糖通过增加葡萄糖-6-磷酸酯酶的活性和胰岛敏感性起到降血糖的作用[6]。尽管这些活性成分功能显著,它们在实际应用中却普遍面临热稳定性差等问题,这可能会限制西洋参功能产品的开发。因此,提高它们的热稳定性是至关重要的。

研究表明纳米递送体系能够解决活性物质稳定性差等问题,同时也可以改变它们的功能特性[7−8]。通常采用反溶剂沉淀法制备纳米颗粒,该方法具有操作简便、条件温和等优点[9]。大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)具有良好的两亲性、乳化性和生物相容性,常被用作纳米载体材料[10−11]。此外,多糖的引入不仅能与蛋白质通过相互作用增强纳米结构的稳定性,还可带来功能上的协同效应[12]。现有研究多集中于西洋参单一成分的纳米化,然而这种方式难以充分发挥西洋参的保健功效[13]。因此,构建一种能够同时包载皂苷、黄酮和多糖的复合纳米递送体系,并系统评价其生物活性,对于深入挖掘西洋参的资源价值并提升其功能特性具有重要意义。

基于此,本研究创新性地以西洋参活性提取物(富含皂苷、黄酮与多糖)为核心,与大豆分离蛋白通过反溶剂沉淀法制备西洋参复合纳米颗粒(AG Nps)。以包封率和载药量作为指标,在单因素实验的基础上,利用响应面优化 AG Nps 的制备工艺,通过粒径、Zeta 电位、红外光谱分析、差示扫描量热法和热重分析对其结构和理化性质进行表征,并对其体外抗氧化性、降血脂和降血糖活性进行评价,以期为西洋参纳米复合物的开发与综合利用提供新的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

西洋参　黑龙江省东渡参业有限公司;十二烷基硫酸钠、含蛋白酶的人工胃肠液　上海源叶生物科技有限公司;乙醇　天津市富宇精细化工有限公司;大豆分离蛋白、甲醇、亚硝酸钠、氢氧化钠、月桂酸 4-硝基苯脂　上海化学试剂公司;亚硝酸钠、乙腈、胃蛋白酶(3000 U/mg)、胰蛋白酶(2500 U/mg)、牛磺胆酸钠、胆固醇、α-葡萄糖苷酶(50 U/mg)、α-淀粉酶(50 U/mg)、阿卡波糖　上海麦克林生化科技股份有限公司;硫酸　天津市科密欧化学试剂有限公司;人参皂苷 Rg1、Re、Rb1、Rg2、Rc、Rh1、Ro、Rb2、Rd、Rg3、S-Rh2、R-Rh2、F1、CK　北京索莱宝科技有限公司。

HJ-4 磁力搅拌器　常州丹瑞实验仪器设备有限公司;90PLUSPALS 激光粒度仪　美国 NanoBrook 仪器公司;KQ-400KDE 超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司;3-18K 冷冻离心机　德国 SIGMA 公司;RV10 旋转蒸发器　岐昱实业上海有限公司;Q2000 差示扫描量热仪　美国 TA 公司;Nicolet IS20 傅里叶变换红外光谱仪　美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 西洋参的皂苷、黄酮、多糖提取　称取 1 g 西洋参粉(American ginseng powder, AGP),于 50 mL 锥形瓶中,向其中加入 20 mL 0.5% 十二烷基硫酸钠(SDS)溶液,微波功率 300 W,超声功率 300 W,提取 30 s。将提取后得到粗提物(American ginseng extraction, AGE)经 8000 r/min 离心 15 min,取上清液,加入无水乙醇醇沉,再离心 15 min,上清液 60 ℃旋蒸,冻干后得到人参皂苷与黄酮的混合物(黄酮、多糖、皂苷浓度分别为 2.26、68.14、135.72 mg/g)。同时收集沉淀部分粗多糖,用热乙醇多次冲洗,除去 SDS 后冷冻干燥,得到粗多糖粉末。

1.2.2 西洋参皂苷/黄酮/多糖/大豆分离蛋白纳米颗粒的制备　参考李晓晖等[14]的方法作适当修改,利用反溶剂沉淀法制备纳米颗粒,称取一定量的西洋参皂苷和黄酮混合粉末溶于适量无水乙醇中,不断搅拌(700 r/min, 15 min);将相同质量的多糖和大豆分离蛋白溶于适量蒸馏水中,以 1 mL/min 的速率缓慢地滴入皂苷-黄酮乙醇溶液中并不断搅拌(5000 r/min),45 ℃减压除去无水乙醇,4000 r/min 离心 10 min,

将沉淀冷冻干燥，即为西洋参皂苷/黄酮/多糖/大豆分离蛋白纳米粒（AG Nps）。

1.2.3　西洋参纳米颗粒的制备条件工艺优化

1.2.3.1　单因素实验　固定溶剂相西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度 15 mg/mL，反溶剂相/溶剂相体积比 30∶1，考察反溶剂相西洋参皂苷/黄酮浓度 5、10、15、20、25 mg/mL 对 AG Nps 的包封率和载药量的影响。

固定反溶剂相西洋参皂苷/黄酮浓度 20 mg/mL，反溶剂相/溶剂相体积比 30∶1，考察溶剂相西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度 5、10、15、20、25 mg/mL 对 AG Nps 的包封率和载药量的影响。

固定反溶剂相西洋参皂苷/黄酮浓度 20 mg/mL，溶剂相西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度 15 mg/mL，考察反溶剂相/溶剂相体积比 10∶1、20∶1、30∶1、40∶1、50∶1 对 AG Nps 的包封率和载药量的影响。

1.2.3.2　Box-Behnken 响应面法优化试验　在单因素实验基础上选取西洋参皂苷/黄酮浓度（A）、西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度（B）、反溶剂相/溶剂相体积比（C），以包封率和载药量为指标，根据 Box-Behnken 原理，通过 Design-Expert 8.0.6 软件优化试验设计，进行 3 因素 3 水平共 17 组试验，以期得到准确的二次回归方程，阐释各因素对响应值的交互作用，响应面试验因素水平见表 1。

表 1　响应面试验因素水平

Table 1　Response surface test factors and levels

因素	水平		
	−1	0	1
A反溶剂相浓度（mg/mL）	10	15	20
B溶剂相浓度（mg/mL）	10	15	20
C反溶剂相/溶剂相体积比	30∶1	40∶1	50∶1

1.2.4　西洋参皂苷和黄酮浓度的测定

1.2.4.1　皂苷浓度的测定　皂苷浓度测定参考陈晗等[15]的方法稍作修改。色谱条件：色谱柱为 Waters C_{18}（250 mm×4.6 mm，5 μm）柱；检测波长为 203 nm；柱温为 40 ℃；流速为 1.0 mL/min；流动相为乙腈-水溶液；梯度洗脱程序为：0~25 min，乙腈-水（20∶80）；25~60 min，乙腈-水（40∶60）；60~90 min，乙腈-水（55∶45）；90~120 min，乙腈-水（55∶45）。精密称取标准品若干（人参皂苷 Rg1、Re、Rb1、Rg2、Rc、Rh1、Ro、Rb2、Rd、Rg3、S-Rh2、R-Rh2、F1、CK），置于容量瓶中，用甲醇溶液定容，0.22 μm 微孔滤膜过滤，即得对照品溶液。14 种皂苷线性回归方程如表 2 所示，样品进样量为 20 μL，依据标准曲线计算样品中人参皂苷含量，总皂苷的含量为各皂苷之和。

1.2.4.2　黄酮浓度的测定　采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定黄酮的浓度[16]。样品中加入 60% 乙醇稀释至 5 mL。加入 5% 的亚硝酸钠溶液 0.3 mL，摇匀，静置 8 min，再加 10% 硝酸铝溶液 0.3 mL，摇匀，静置 10 min，加入 4% 的氢氧化钠溶液 4 mL，用 60% 乙醇定容。摇匀静置 10 min，以相应试剂为空白对照，在 510 nm 处测量吸光度。以芦丁质量浓度为横坐标，吸光值为纵坐标，绘制芦丁标准曲线为：y=0.1196x+0.0076，R^2=0.9993。

表 2　皂苷的标准曲线

Table 2　Standard curves of saponins

成分	回归方程	R^2	线性范围（mg/mL）
人参皂苷Rg1	y=38.053x+0.7340	0.996	0.22~2.22
人参皂苷Re	y=49.241x+0.8101	0.998	0.23~1.94
人参皂苷Rb1	y=38.056x+0.7341	0.999	0.30~2.25
人参皂苷Rg2	y=67.803x+0.0279	0.998	0.05~0.60
人参皂苷Rc	y=46.459x+0.1264	0.995	0.05~0.56
人参皂苷Rh1	y=72.002x+0.3141	0.999	0.02~1.24
人参皂苷Ro	y=53.921x+0.0586	0.997	0.03~0.30
人参皂苷Rb2	y=43.575x+0.1734	0.994	0.05~0.58
人参皂苷F1	y=75.454x+0.1156	0.995	0.03~0.35
人参皂苷Rd	y=49.523x+1.1787	0.995	0.20~2.15
人参皂苷Rg3	y=59.901x+0.0246	0.999	0.03~0.30
人参皂苷CK	y=91.097x+0.229	0.998	0.05~0.60
人参皂苷S-Rh2	y=93.628x−0.0134	0.998	0.002~0.015
人参皂苷R-Rh2	y=84.054x+0.0444	0.997	0.002~0.020

1.2.5　载药量和包封率的测定　根据张欣等[17]的方法测定复合纳米颗粒的包埋率与载药量，精密称取 0.1 g AG Nps，加入无水乙醇 10 mL，超声 30 min 后无水乙醇定容至 25 mL，8000 r/min 离心 15 min 使复合纳米颗粒破碎以释放出包埋的皂苷、黄酮、多糖，取上清液溶液，计算溶液中总皂苷和黄酮的浓度，离心后的沉淀为多糖，称量其质量。按照 1.2.4 含量测定方法计算皂苷和黄酮的浓度，代入以下公式：

$$\text{包封率}(\%)=\frac{\text{皂苷黄酮浓度和}(\text{mg/mL})\times\text{乙醇体积}(\text{mL})+\text{多糖质量}(\text{mg})}{\text{总添加量}(\text{mg})}\times 100$$

$$\text{载药量}(\%)=\frac{\text{皂苷黄酮浓度和}(\text{mg/mL})\times\text{乙醇体积}(\text{mL})+\text{多糖质量}(\text{mg})}{\text{纳米粒总质量}(\text{mg})}\times 100$$

1.2.6　西洋参纳米粒的表征

1.2.6.1　粒径、多分散指数和 Zeta 电位的测定　参考胡夏恬等[18]的方法并略有修改，将制备的 AG Nps 稀释至合适浓度后，置于样品池中，采用激光粒度分析仪测定 AG Nps 的粒径、多分散指数（Particle distribution index，PDI）和 Zeta 电位。

1.2.6.2　傅里叶红外光谱分析　分别取 AG Nps、SPI、西洋参皂苷黄酮和粗多糖各 2 mg，与 200 mg 的溴化钾粉末混合研匀，压片，利用红外光谱仪测定 400~4000 cm^{-1} 范围内的透光率。

1.2.6.3　差示扫描量热分析　参考 Hosseini 等[19]的方法并略有修改，以空铝坩作为空白，在铝坩中分别放置 5 mg 的 AGP 和 AG Nps，N_2 为吹扫气，以 10 ℃/min 的升温速度，在 20~300 ℃ 温程内进行差示扫描量热分析。

1.2.6.4　热重分析　利用热重分析仪测定 AGP 和

AG Nps 的热稳定性和组分。取适量样品，温度从 40 ℃ 逐渐程序上升至 800 ℃，升温速率 10 ℃/min。

1.2.7 体外抗氧化实验

1.2.7.1 DPPH 自由基清除能力 分别吸取 2 mL 各浓度 V_C 对照溶液、AG Nps、AGP 和 AGE 溶液，加入 2 mL 的 DPPH 溶液，充分混合均匀后，密封且避光放置 30 min，在 517 nm 处测定各样品的吸光度值，A_0 为 DPPH 溶液的吸光度，A_1 为样品溶液的吸光度，A_2 为样品和 DPPH 溶液的吸光度，代入以下公式：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100$$

1.2.7.2 $ABTS^+$自由基清除能力 取 4.8 mL ABTS 试液，分别加入 0.2 mL 各浓度 V_C 对照溶液、AG Nps、AGP 和 AGE 溶液，密封避光反应 30 min，空白用 1 mmol/L pH 为 7.4 的磷酸盐缓冲液调零，在 734 nm 波长下检测各试样的吸光度，A_0 为 ABTS 溶液的吸光度，A_1 为样品溶液的吸光度，A_2 为样品和 ABTS 溶液的吸光度，代入以下公式：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100$$

1.2.8 体外降血脂活性的测定

1.2.8.1 抑制胰脂肪酶活性的测定 参考王威振等[20]的方法，取 3 mL PBS（pH7.4）和 3 mL 0.08% 的月桂酸 4-硝基苯脂溶液于锥形瓶中，混匀后放置在 37 ℃ 恒温培养箱，10 min 后，分别与 AG Nps、AGP 和 AGE 混合均匀，配制成浓度为 3、6、9、12、15、18 mg/mL 的样品溶液，然后加入 3 mL 1 mg/mL 猪胰脂肪酶，在 37 ℃ 恒温水浴中 30 min，以奥利司他为阳性对照，在 410 nm 处测定吸光度值 A，A_1 为不加酶液的样品组吸光度值，A_0 为不加酶液组的吸光度值，A_2 为无酶液无样品组的吸光度值，计算公式如下：

$$\text{胰脂肪酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A-A_1}{A_0-A_2}\right)\times 100$$

1.2.8.2 胆酸盐结合能力的测定 参照何旭华等[21]的研究方法，取 0.5 g AGP、AGE、AG Nps，加入 3 mL 胃蛋白酶（10 mg/mL），1 mL 0.01 mol/L 的盐酸，在 37 ℃ 恒温水浴中振荡消化 1 h，模拟胃部消化的作用。用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液调节溶液的 pH 至 6.3，加入 4 mL 的胰蛋白酶（10 mg/mL），在 37 ℃ 恒温水浴中振荡消化 1 h，模拟肠道消化的作用。向样品中加入 4 mL 甘氨胆酸钠（0.5 mmol/L），4 mL 牛磺胆酸钠（0.5 mmol/L）和 4 mL 胆酸钠（0.5 mmol/L），在 37 ℃ 恒温水浴中振荡消化 1 h。将混合溶液在 10000 r/min 下离心 20 min，取上清液。以 0.25 mg/mL 的辛伐他汀为阳性对照，在 387 nm 波长处测定吸光度值以计算胆酸盐结合能力，分别绘制甘氨胆酸钠（y=2.8473x+0.0319，R^2=0.9973）、牛磺胆酸钠（y=1.8793x+0.1544，R^2=0.9914）与胆酸钠（y=1.2413x+0.019，R^2=0.9948）的标准曲线。胆酸盐结合率计算公式如下：

$$\text{胆酸盐结合率}(\%)=\frac{\text{胆酸盐加入量}-\text{胆酸盐剩余量}}{\text{胆酸盐加入量}}\times 100$$

1.2.8.3 胆固醇胶束溶解度的抑制率测定 参考冯丹丹等[22]的方法，配制胆固醇胶束溶液：精确称取 7.7 mg 胆固醇、53.8 mg 牛磺胆酸钠、77.1 mg 氯化钠和 14.1 mg 油酸，溶于 2.5 mmol/L pH7.4 的磷酸盐缓冲液中。随后，将混合溶液在 160 W 功率下超声均质 50 min。取不同浓度的 AGP、AGE、AG Nps 溶液与胶束溶液等体积混合，在 37 ℃ 下振荡培养 2 h，在 14000 r/min 下离心 20 min，收集上清液。采用比色法测定胆固醇含量，样品溶液的胆固醇溶解度为 A，A_0 为蒸馏水与胆固醇胶束的吸光度值，胆固醇胶束溶解度抑制率计算公式如下：

$$\text{胆固醇胶束溶解度抑制率}(\%)=\frac{A_0-A}{A_0}\times 100$$

1.2.9 体外降血糖活性研究

1.2.9.1 α-葡萄糖苷酶抑制率的测定 参考 Chen 等[23]的方法，取 40 μL 不同浓度的 AGP、AGE、AG Nps 溶液，加入 40 μL 的 1 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液均匀混合，于 37 ℃ 水浴中混合反应 10 min，再加入 20 μL 7.5 mmol/L 的 p-NPG 溶液，在 37 ℃ 水浴中反应 30 min，再加入 0.1 mol/L 的碳酸钠溶液 100 μL 终止反应。在 410 nm 处测定吸光度值 A，用阿卡波糖做阳性对照，将不加入 α-葡萄糖苷酶溶液的作为样品空白，记为 A_0；将未受抑制的酶作为空白对照，记为 A_1。α-葡萄糖苷酶抑制率计算公式如下：

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A-A_0}{A_1}\right)\times 100$$

1.2.9.2 α-淀粉酶抑制活性的测定 取 20 μL 不同质量浓度的 AGP、AGE、AG Nps 分别与 100 μL 的 1 U/mL 的 α-淀粉酶溶液在 37 ℃ 水浴中混合反应 10 min，再加入 300 μL 的 1% 的可溶性淀粉溶液，于 37 ℃ 水浴中混合反应 10 min，之后加入 50 μL 的 DNS 显色剂，混匀，在 100 ℃ 水浴反应 5 min，冷却后，用 PBS 缓冲液稀释至 10 mL，于 540 nm 处测量吸光度 A，将不加入 α-淀粉酶溶液的作为样品空白，记为 A_0；将不加样品未受抑制的酶作为对照，记为 A_1，α-淀粉酶抑制率计算公式如下：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A-A_0}{A_1}\right)\times 100$$

1.3 数据处理

每个实验至少重复三次，结果表示为“平均值±标准差”，采用 Origin 2019 软件作图，Excel 数据处理，使用 SPSS 26 软件对数据进行方差分析，统计差异通过单因素方差分析（ANOVA）确定，使用软件 Design-Expert 12 对响应面优化试验数据进行分析。

2　结果与分析

2.1　西洋参纳米颗粒的制备工艺优化结果

2.1.1　单因素实验　如图 1A 所示，随着皂苷/黄酮浓度的升高，包封率和载药量出现先上升后下降的趋势，当浓度达到 15 mg/mL 时包封率和载药量达到最大值，分别为 85.21%±2.80% 和 0.88%±0.07%。初始的上升趋势归因于体系过饱和度增加，加速了晶核的形成，并且与载体材料相互作用增强[24−25]。然而，当浓度超过临界值后，体系变得不稳定，导致包封率和载药量下降。这可能是由于过高的浓度导致了颗粒的快速、无序聚集，导致一部分皂苷/黄酮游离在外[26]。因此，西洋参皂苷/黄酮浓度选择 10、15、20 mg/mL 进行后续响应面优化设计。

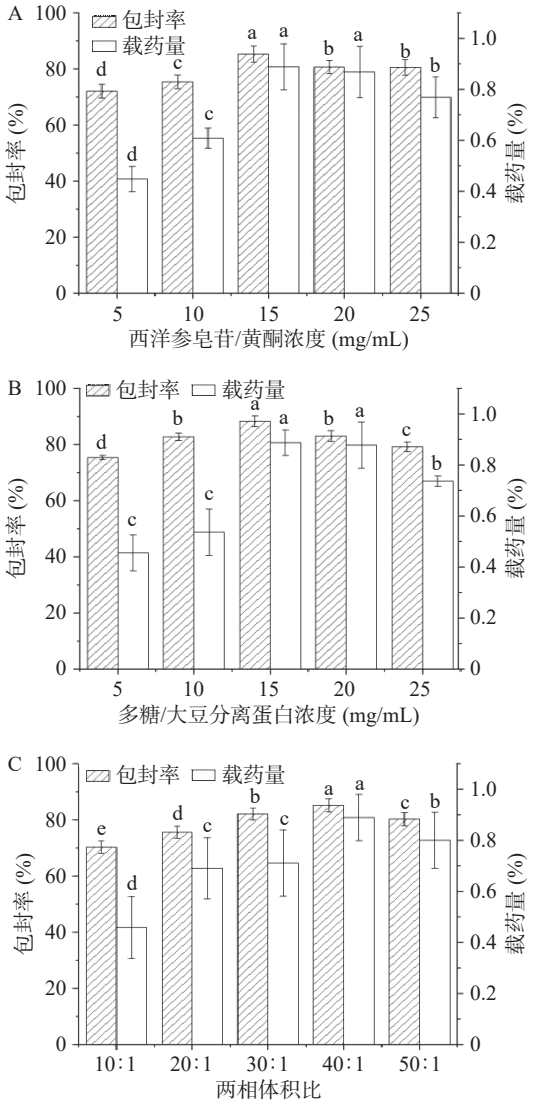


图 1　皂苷/黄酮浓度（A）、多糖/大豆分离蛋白浓度（B）、两相体积比（C）对 AG Nps 包封率和载药量的影响

Fig.1　Effects of saponin/flavonoid concentration (A), polysaccharide/soy protein isolate concentration (B), and volume ratio (C) on the encapsulation efficiency and drug loading of AG Nps

注：不同字母表示差异显著（P<0.05），图 9 同。

如图 1B 所示，多糖与大豆分离蛋白浓度对 AG Nps 的包封率与载药量具有显著影响（P<0.05）。当浓度升高至 15 mg/mL 时，多糖与大豆分离蛋白对皂苷黄酮具有更好的包埋和保护作用，包封率与载药量上升[27]。然而，当浓度超过 15 mg/mL 后，过量的多糖和大豆分离蛋白可能会发生自聚集[28]，减少了交联位点，从而导致包封率呈现下降趋势。因此，多糖/大豆分离蛋白浓度选择 10、15、20 mg/mL 进行后续响应面优化设计。

如图 1C 所示，两相体积比在 40∶1 时包封率和载药量达到最大值，分别为 85.22%±2.31% 和 0.89%±0.09%。体积比较小时，体系内活性物质被高效地包封在颗粒内部，包封率和载药量逐渐上升。然而，当体积比超过 40:1 后，过度的稀释会降低多糖/大豆分离蛋白的浓度，并可能在高剪切环境下破坏了纳米颗粒的稳定性[29]，从而导致包封率与载药量的下降。综上，两相体积比选择 30∶1、40∶1、50∶1 进行后续响应面优化设计。

2.1.2　Box-Behnken 响应面试验结果　根据表 1 中的因素与水平，通过软件 Design Expert 进行 17 次试验，在中心点进行 5 个重复实验（用于估计试验误差），优化西洋参纳米颗粒制备工艺条件。每个实验重复进行三次，以减少系统误差的变异性的影响。BBD 试验设计与结果见表 3。

表 3　响应面分析方案与试验结果

Table 3　Program and experimental results of response surface methodology

试验号	A	B	C	Y_1: 包封率(%)	Y_2: 载药量(%)
1	1	1	0	76.61±2.52	0.69±0.07
2	−1	−1	0	62.84±2.49	0.43±0.11
3	0	0	0	89.31±0.81	1.10±0.11
4	−1	1	0	85.99±2.05	0.51±0.06
5	−1	0	−1	75.54±2.89	0.54±0.12
6	−1	0	1	71.83±2.69	0.64±0.11
7	0	1	1	74.52±1.73	0.69±0.11
8	0	0	0	91.70±1.13	1.13±0.17
9	0	0	0	90.40±2.25	1.06±0.12
10	0	−1	−1	77.36±1.87	0.73±0.09
11	1	−1	0	75.91±2.31	0.85±0.18
12	0	0	0	89.41±1.11	1.04±0.11
13	0	0	0	90.96±2.12	1.10±0.24
14	1	0	1	79.67±2.42	0.66±0.12
15	0	−1	1	80.43±1.77	0.80±0.07
16	1	0	−1	88.48±2.03	0.87±0.09
17	0	1	−1	90.15±2.67	0.84±0.05

响应面分析采用非线性拟合的方法，得到拟合方程。对表 3 Y_1 包封率拟合的方程如下：Y_1=91.14+3.06A+3.84B−3.13C−5.60AB−1.28AC−4.68BC−8.80A^2−7.05B^2−3.52C^2。在方程式中，A 代表西洋参皂苷/黄酮浓度，B 代表西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度，C 代表反溶剂相/溶剂相体积比。方程式中各个数值的绝对值大小及正负为各个因素对 Y_1 值的影响程度及方向。从方程式中可以看出，A、B 和 C 的系数绝对值分别为 3.06、3.84 和 3.13。由此可以得

出，对包封率影响的顺序为 B>C>A，也就是说，多糖/大豆分离蛋白浓度>体积比>皂苷/黄酮浓度。如表 4 所示，A、B、C 的 P 值均小于 0.05，说明以上三个因素对模型影响显著。AB 和 BC 对包封率的影响显著。模型项的 F=39.95，P<0.01，说明模型显著。失拟项的 F=5.47，P=0.0672，失拟项不显著，说明模型设计合理。相关系数 R^2=0.9275，调整后 R^2_{Adj}=0.9495 的高值表明实际结果与模型预测数据之间的一致性，说明模型可靠性良好。能很好说明包封率与上述三种因素水平之间的内在联系，因此，可用得到的回归方程进行预测和分析。同时对表 3 的数据进行二元多次回归拟合，A、B、C 三个因素对包封率值（Y_1）的交互作用关系见图 2。三维响应面图开口向下，等高线呈椭圆形，表明因素间交互作用明显。响应曲面的趋势与单因素的实验结果一致。一般响应曲线越陡峭，等高线越密集，该工艺条件对响应值影响越显著，交互作用越强。

表 4 包封率回归模型方差分析

Table 4 Variance analysis of encapsulation efficiency regression model

来源	平方和	自由度	均差	F值	P值	显著性
模型	1136.02	9	126.22	39.95	0.0031	significant
A	75.03	1	75.03	5.91	0.0453	*
B	117.81	1	117.81	9.29	0.0187	*
C	78.12	1	78.12	6.16	0.0421	*
AB	125.44	1	125.44	9.89	0.0163	*
AC	6.5	1	6.5	0.51	0.4972	
BC	87.42	1	87.42	6.89	0.0342	*
A^2	325.69	1	325.69	25.67	0.0015	**
B^2	208.98	1	208.98	16.47	0.0048	**
C^2	52.17	1	52.17	4.11	0.0822	
残差	88.81	7	12.69			
失拟项	71.4	3	23.8	5.47	0.0672	not significant
纯误差	17.41	4	4.35			
总离差	1224.84	16				
R^2	0.9275					
R^2_{Adj}	0.9495					

注：*表示差异显著（P<0.05），**表示差异极显著（P<0.01）。

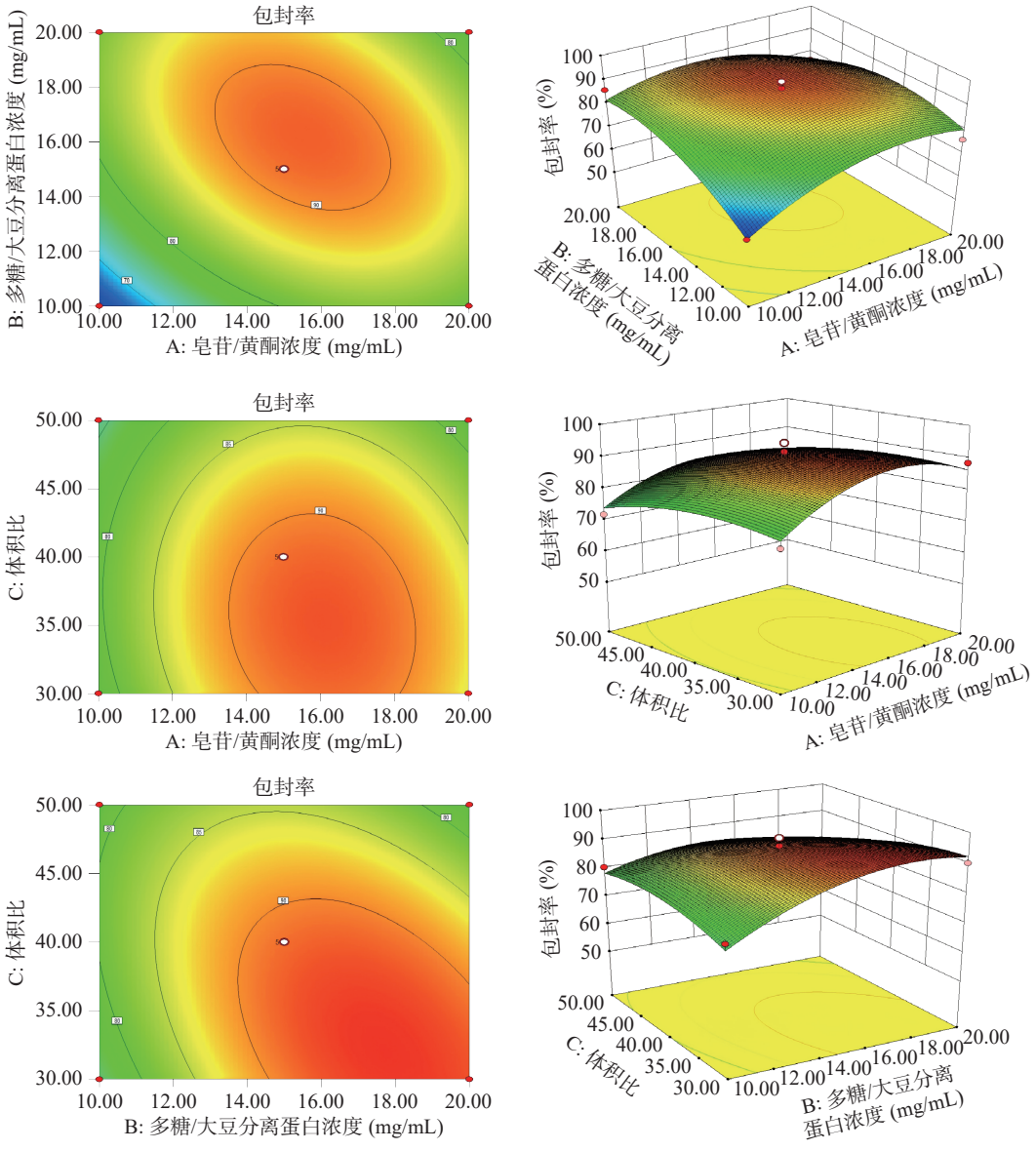


图 2 两因素交互作用对包封率影响的等高线与曲面图

Fig.2 Contour and response surface plots showing the interactive effect of variables on encapsulation efficiency

对 Y_2 载药量拟合的方程如下：Y_2=1.09+0.12A−0.009B−0.024C−0.060AB−0.080AC−0.057BC−0.28A^2−0.19B^2−0.13C^2。A、B 和 C 的系数绝对值分别为 0.12、0.009 和 0.024，对载药量影响的顺序为皂苷/黄酮浓度>反溶剂相/溶剂相体积比>多糖/大豆分离蛋白浓度。如表 5 所示，AC、AB 和 BC 对载药量的影响显著。模型项的 F=44.29，P<0.0001，说明模型显著。失拟项的 F=2.06，P=0.2478，失拟项不显著，说明模型设计合理。相关系数 R^2=0.9827，调整后 R^2_{Adj}=0.9606，说明该模型对实验数据的拟合度良好，能很好说明载药量与上述三种因素水平之间的内在联系，因此，可用得到的回归方程进行预测和分析。如图 3 所示，三维响应面图开口向下，等高线呈椭圆形，表明因素间交互作用明显，响应曲面的趋势与单因素的实验结果一致。

2.1.3　验证实验　通过响应面试验得到西洋参纳米颗粒最佳制备工艺分别为西洋参皂苷/黄酮浓度为

表 5　载药量回归模型方差分析

Table 5　Variance analysis of drug loading capacity regression model

来源	平方和	自由度	均差	F值	P值	显著性
模型	0.78	9	0.086	44.29	<0.0001	significant
A	0.11	1	0.11	58.9	0.0001	**
B	7.03×10^{-4}	1	7.03×10^{-4}	0.36	0.5669	
C	4.66×10^{-3}	1	4.66×10^{-3}	2.39	0.1660	
AB	0.015	1	0.015	7.45	0.0293	*
AC	0.025	1	0.025	13.06	0.0086	**
BC	0.013	1	0.013	6.67	0.0363	*
A^2	0.32	1	0.32	165.69	<0.0001	**
B^2	0.15	1	0.15	76.89	<0.0001	**
C^2	0.074	1	0.074	38.01	0.0005	**
残差	0.014	7	1.95×10^{-3}			
失拟项	8.28×10^{-3}	3	2.76×10^{-3}	2.06	0.2478	not significant
纯误差	5.35×10^{-3}	4	1.34×10^{-3}			
总离差	0.79	16				
R^2	0.9827					
R^2_{Adj}	0.9606					

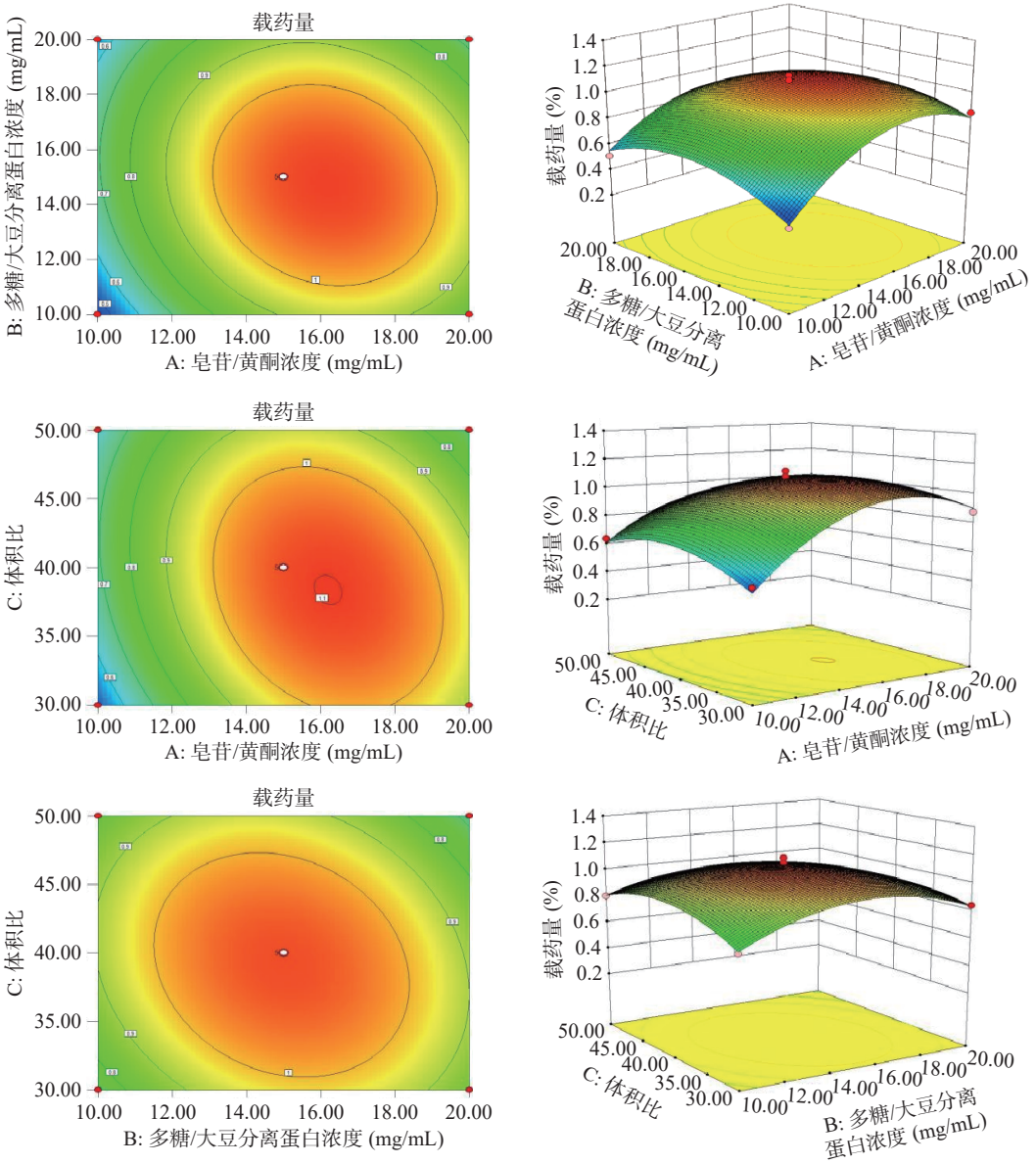


图 3　两因素交互作用对载药量影响的等高线与曲面图

Fig.3　Contour and response surface plots showing the interactive effect of variables on drug loading

16.21 mg/mL、西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度为 14.80 mg/mL 和反溶剂相/溶剂相体积比为 38.45∶1。此模型预测的包封率为 91.67%，载药量为 1.10%。根据实际操作需要，现实最佳工艺条件调整为西洋参皂苷/黄酮浓度 16 mg/mL、西洋参多糖/大豆分离蛋白浓度 15 mg/mL 和反溶剂相/溶剂相体积比 39∶1，得到包封率 90.14%±1.03%，载药量为 1.11%±0.07%，实际值与理论值相近，说明该响应面方法应用可靠。

2.2 西洋参纳米粒的表征

2.2.1 粒径、PDI 和 Zeta 电位的测定 如图 4 所示，AG Nps 的平均粒径为 318.60±5.60 nm，PDI 为 0.287±0.032。粒径和 PDI 一定程度上可以反映体系是否均匀，判断体系的物理稳定性。研究表明，粒径越小且粒度分布越均匀，体系越稳定[30]。PDI 值在 0~0.3 之间表明 AG Nps 具有较好的分散均匀性[31]。Zeta 电位用于评价西洋参纳米粒的表面物理性能，根据双电层理论，一定的电荷能够抑制微粒之间相互聚集，从而提升制剂的物理稳定性[32]。一般认为，当 Zeta 电位的绝对值大于 30 mV 时，静电的相互排斥使得纳米粒子具有良好的稳定性[33]。AG Nps 的 Zeta 电位为-33.05±0.50 mV，说明 AG Nps 稳定性较好。

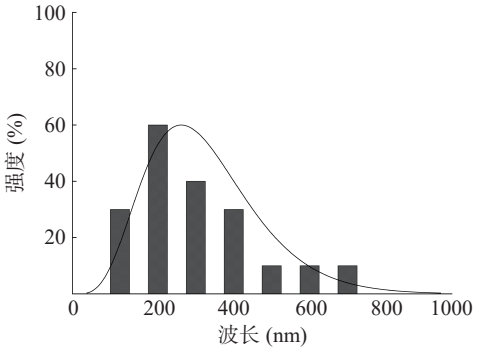


图 4 AG Nps 的粒径分布曲线

Fig.4 Particle size distribution curve of AG Nps

2.2.2 傅里叶变换红外光谱分析 如图 5 所示，SPI 和 AGE 分别在 3419、3407 cm^{-1} 处存在-OH 拉伸振动吸收峰，在 1624、1615 cm^{-1} 处存在 C=O 拉伸吸收峰[31]。此外，SPI 在 1365 cm^{-1} 处存在 COO-拉伸振动[27]。与 AGE 的红外图谱相比，AG Nps 在 1222 和 2920 cm^{-1} 处的特征吸收峰显著减弱，这表明活性成分已被成功包埋于纳米颗粒内部。

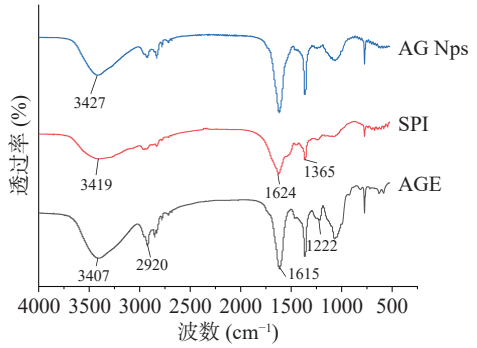


图 5 AG Nps、SPI 和 AGE 的傅里叶变换红外图谱

Fig.5 Fourier transform infrared spectra of AG Nps, SPI, and AGE

2.2.3 差示扫描量热分析 AGE 和 AG Nps 的 DSC 如图 6 所示。AGE 和 AG Nps 分别在 158.93 ℃ 和 172.63 ℃ 出现一个向下的吸热峰，表明 AG Nps 热稳定性高于 AGE。

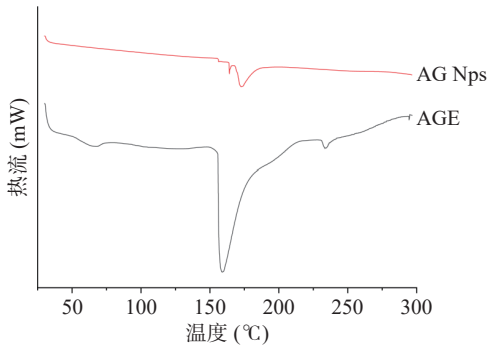


图 6 AGE 和 AG Nps 的差示扫描量热分析

Fig.6 Differential scanning calorimetry analysis of AGE and AG Nps

2.2.4 热重分析 图 7 是 AGE 和 AG Nps 的热重检测图谱。AGE 与 AG Nps 的质量损失在 200 ℃ 以前都有一段缓慢下降的过程，在 200~500 ℃ 期间进入快速失重阶段，在 500 ℃ 后趋于平稳。AG Nps 起始分解温度为 208.44 ℃，AGE 的起始分解温度为 150.97 ℃，并且 AG Nps 的质量损失更小，说明 AG Nps 热稳定高于 AGE，这与 DSC 结果一致。

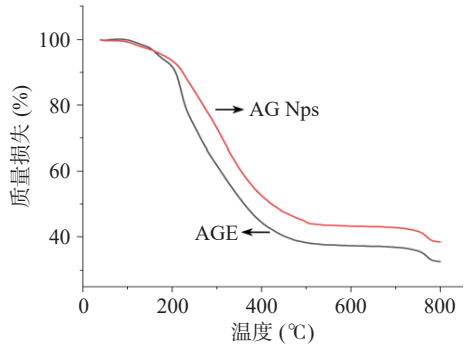


图 7 AGE 和 AG Nps 的热重分析

Fig.7 Thermogravimetric analysis of AGE and AG Nps

2.3 体外抗氧化实验

2.3.1 DPPH 自由基清除能力 如图 8A 所示，在 1~80 mg/mL 浓度范围内，AGP、AGE 和 AG Nps 对 DPPH 自由基的清除能力均呈现剂量依赖性。可以看出，在相同浓度下，对于 DPPH 自由基的清除能力强弱为：AG Nps >AGE>AGP（$P<0.05$），证明纳米化有效提高了 AGE 的抗氧化能力。此外，AGP、AGE 和 AG Nps 的 IC_{50} 分别为 36.87、25.08 和 14.30 mg/mL，表明 AG Nps 的 DPPH 自由基清除能力最强。

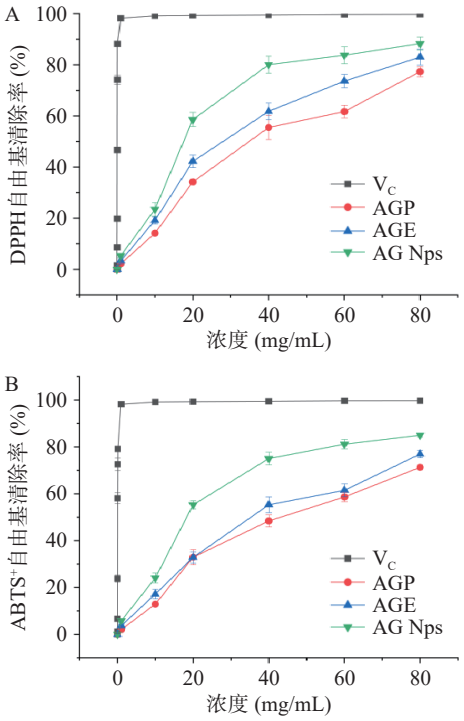


图 8　V_C、AGP、AGE 和 AG Nps 对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除作用

Fig.8　Scavenging effect of V_C, AGP, AGE, and AG Nps on DPPH and $ABTS^+$ free radicals

2.3.2　$ABTS^+$自由基清除能力　如图 8B 所示，AGP、AGE 和 AG Nps 均具有一定的 $ABTS^+$自由基清除能力，且随着浓度的增加，$ABTS^+$自由基清除能力就越强。AGP、AGE 和 AG Nps 的 IC_{50} 分别为 45.88、35.27、16.01 mg/mL，表明 AG Nps 的 $ABTS^+$自由基清除能力最强，这与 DPPH 自由基清除能力结果一致。主要原因可能是纳米颗粒可以提升其稳定性，减少了活性物质的分解，从而提高其体外抗氧化性[31]。

2.4　体外降血脂活性的测定

2.4.1　抑制胰脂肪酶活性的测定　胰脂肪酶是消化系统中分解甘油三酯的关键酶，由胰腺分泌，在小肠中发挥核心作用，因此抑制胰脂肪酶的活性是减少脂肪摄入的关键[34]。如图 9A 所示，AGP、AGE 和 AG Nps 抑制胰脂肪酶活性的 IC_{50} 值分别为 16.21、12.69 和 7.29 mg/mL。AGP、AGE 和 AG Nps 对胰脂肪酶的抑制作用随浓度升高而增强，其中 AG Nps 的抑制能力最强，浓度在 18 mg/mL 时，抑制率达到 81.69%±1.26%，而 AGP 和 AGE 对胰脂肪酶的抑制率为 53.91%±2.57% 和 69.61%±1.29%，显著低于 AG Nps（P<0.05）。Joaquín 等[35] 证实皂苷、多酚类物质可以通过抑制胰脂肪酶的活性来改善高血脂症，而纳米结构可以提高活性物质的稳定性，从而发挥更好的作用。

2.4.2　胆酸盐结合能力的测定　胆酸盐在脂质消化、吸收和转运中发挥核心作用，它的两亲性结构可以帮助脂肪水解的产物穿过水相被吸收，因此胆酸盐的结合能力直接影响脂质代谢。如图 9B 所示，结合胆酸

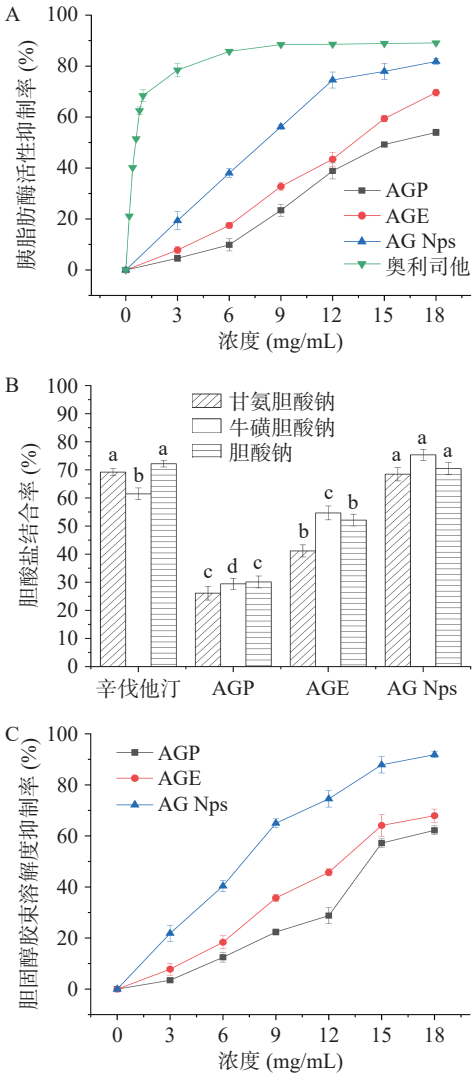


图 9　奥利司他、辛伐他汀、AGP、AGE 和 AG Nps 的体外降血脂活性

Fig.9　*In vitro* hypolipidemic activities of orlistat, simvastatin, AGP, AGE and AG Nps

盐的能力由高到低的顺序：AG Nps>AGE>AGP，AG Nps 对于甘氨胆酸钠、牛磺胆酸钠和胆酸钠的结合率分别为 68.45%±2.39%、75.36%±1.97% 和 70.45%±2.15%，纳米结构的高比表面积、可调控的表面电荷和功能基团可显著增强对胆酸盐的吸附能力[36]。研究表明，蛋白质在消化过程中能有效结合胆酸盐，降低了脂肪消化的效率[37]。从图中也可清晰地看出样品与牛磺胆酸钠的结合率最高，这是由于牛磺胆酸钠中磺酸基的强电离性和氢键供受体能力，比胆酸钠和甘氨胆酸钠更易与样品形成稳定复合物[38]。

2.4.3　抑制胆固醇胶束溶解度的测定　胆固醇是人体必需的脂类物质，参与细胞膜构建、激素合成和胆汁酸生成等关键生理功能。然而，过量的胆固醇会引发糖尿病、心脏病、心血管疾病、心梗、慢性肾炎等继发性疾病[39]。研究表明，黄酮类物质可通过降低胆固醇的溶解度来发挥降血脂的作用[40]。如图 9C 结果显示，AGP、AGE 和 AG Nps 抑制胆固醇胶束溶解度的 IC_{50} 值分别为 15.11、12.11 和 6.32 mg/mL。

AGP、AGE 和 AG Nps 对胆固醇胶束溶解度的抑制作用随浓度升高而增强，AG Nps 抑制能力显著高于 AGP 和 AGE（P<0.05），浓度在 18 mg/mL 时抑制率达到 91.69%±1.25%。

2.5　体外降血糖活性研究

2.5.1　α-葡萄糖苷酶抑制率分析　食物中的碳水化合物在消化过程中首先被 α-淀粉酶分解为低聚糖，随后 α-葡萄糖苷酶进一步水解低聚糖的非还原末端 α-1,4-糖苷键，生成可被小肠吸收的葡萄糖等单糖，这些单糖通过钠依赖性葡萄糖协同转运蛋白进入小肠上皮细胞。因此，降糖类化合物通过抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性，能够减少葡萄糖的释放并延缓其吸收，从而有效控制餐后血糖水平[41]。

图 10A 结果显示，随着溶液浓度的增大，AGP、AGE 和 AG Nps 对 α-葡萄糖苷酶的抑制率均不断上升，当浓度达到 25 mg/mL 时抑制率分别为 66.07%±1.01%、77.2%±1.55% 和 85.24%±0.62%，AGP、AGE 和 AG Nps 抑制 α-葡萄糖苷酶活性的 IC_{50} 值分别为 15.79、7.69 和 3.21 mg/mL，AG Nps 对 α-葡萄糖苷酶的抑制能力显著高于其他两组（P<0.05）。结果表明，纳米结构能显著增强西洋参提取物抑制 α-葡萄糖苷酶活性的能力。

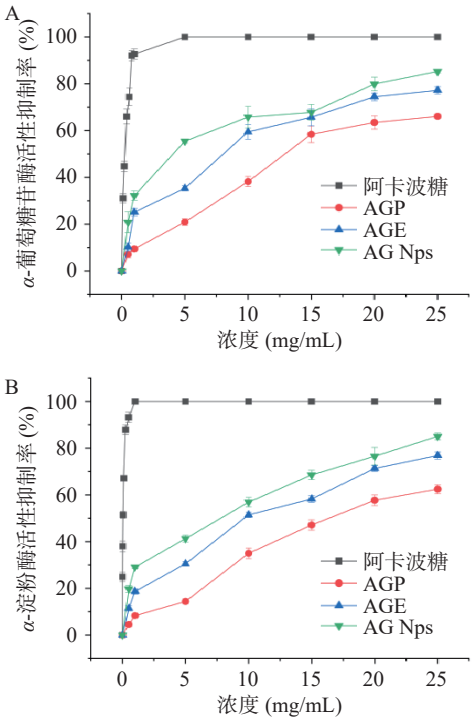


图 10　阿卡波糖、AGP、AGE 和 AG Nps 的体外降血糖活性

Fig.10　*In vitro* hypoglycemic activities of acarbose, AGP, AGE and AG Nps

2.5.2　α-淀粉酶抑制活性分析　如图 10B 所示，AG Nps 对 α-淀粉酶抑制活性最强，浓度在 25 mg/mL 时抑制率为 85.04%±1.43%，其次是 AGE，AGP 抑制效果最差，AGP、AGE 和 AG Nps 抑制 α-淀粉酶活性的 IC_{50} 值分别为 16.37、8.40 和 5.33 mg/mL，说明西洋参纳米颗粒更能发挥抑制 α-淀粉酶的活性。研究表明，纳米粒可以保护胰岛 β 细胞提高对葡萄糖的刺激耐量，控制 α-淀粉酶或 α-葡萄糖苷酶活力[42]。

3　结论

本研究采用反溶剂法制备西洋参皂苷/黄酮/多糖/大豆分离蛋白纳米颗粒（AG Nps），结果表明 AG Nps 的最佳制备工艺为反溶剂相浓度 16 mg/mL、溶剂相浓度 15 mg/mL，体积比 39∶1，包封率 90.14%±1.03%，载药量为 1.11%±0.07%。AG Nps 的平均粒径为 318.6±5.60 nm，PDI 为 0.287±0.032，Zeta 电位为−33.05±0.50 mV。红外分析表明 AG Nps 对活性物质有良好的包埋效果，同时具有良好的热稳定性。体外抗氧化结果表明 AG Nps 的 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除能力最强，IC_{50} 分别为 14.30 mg/mL 和 16.01 mg/mL。体外降血脂结果表明，AG Nps 具有较强的胆酸盐的吸附能力，可以显著抑制胰脂肪酶活性和胆固醇溶解度（P<0.05），对胰脂肪酶和胆固醇胶束活性的 IC_{50} 分别为 7.29 mg/mL 和 6.32 mg/mL。体外降血糖结果表明 AG Nps 对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶活性的 IC_{50} 值分别为 3.21 mg/mL 和 5.33 mg/mL，说明纳米结构能显著增强西洋参活性物质对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶活性的抑制能力（P<0.05）。综上，AG Nps 具有良好的体外抗氧化、体外降血脂和体外降血糖能力。本研究可为西洋参功能性产品的研究和应用提供实验依据。

© 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] ZHANG Yujuan, HOU Lijuan, HU Jing, et al. American ginseng fruit: Antioxidant capacity, bioactive components, and biosynthesis mechanism during development[J]. Food Research International, 2025, 203: 115884.

[2] DONG Rong, ZHANG Yougang, CHEN Shanjun, et al. Identification of key pharmacodynamic markers of American ginseng against heart failure based on metabolomics and zebrafish model[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 909084.

[3] LIU Tiantian, WANG Dan, ZHOU Xinfeng, et al. Study on the mechanism of American ginseng extract for treating type 2 diabetes mellitus based on metabolomics[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 960050.

[4] JIN Yinping, HAO Yan, ZHANG Hao, et al. Dynamic changes of ginsenosides in *Panax quinquefolium* fruit at different development stages measured using UHPLC-Orbitrap MS[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2022, 36(10): e9270.

[5] 郝岩, 王英平, 张志东, 等. 西洋参不同部位皂苷成分差异性分析[J]. 中药材, 2023, 46(5): 1177−1187. [HAO Yan, WANG Yingping, ZHANG Zhidong, et al. Analysis on the differences of saponins in different parts of *Panax quinquefolium*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2023, 46(5): 1177−1187.]

[6] LEE D Y, PARK C W, LEE S J, et al. Immunostimulating and antimetastatic effects of polysaccharides purified from ginseng

berry[J]. The American Journal of Chinese Medicine, 2019, 47(4): 823−839.
[7] AKHTER K F, MUMIN M A, LUI E M K, et al. Transdermal nanotherapeutics: *Panax quinquefolium* polysaccharide nanoparticles attenuate UVB-induced skin cancer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 181: 221−231.
[8] KIM D Y, KADAM A, SHINDE S, et al. Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: A transition replete with opportunities[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(3): 849−864.
[9] ELMIZADEH A, GOLI S A H, MOHAMMADIFAR M A, et al. Fabrication and characterization of pectin-zein nanoparticles containing tanshinone using anti-solvent precipitation method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129463.
[10] 郑彦钊, 陈复生. 大豆分离蛋白基可降解膜的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(9): 198−204. [ZHENG Yanzhao, CHEN Fusheng. Progress in research on soybean protein isolate-based degradable films[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9): 198−204.]
[11] HOU Guohua, LIU Yunyi, ZHANG Liping, et al. Soy protein isolate emulsion microgel particles for encapsulating oil[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 371: 111993.
[12] LEE H, YILDIZ G, dos SANTOS L C, et al. Soy protein nano-aggregates with improved functional properties prepared by sequential pH treatment and ultrasonication[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 55: 200−209.
[13] AKHTER K F, MUMIN M A, LUI E M K, et al. Immunoengineering with ginseng polysaccharide nanobiomaterials through oral administration in mice[J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2019, 5(6): 2916−2925.
[14] 李晓晖, 黄文娟, 周伟, 等. 反溶剂法制备姜黄素-高粱醇溶蛋白复合颗粒及其特性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 7−12. [LI Xiaohui, HUANG Wenjuan, ZHOU Wei, et al. Preparation and characterization of kafirin microparticles encapsulating curcum by anti-solvent method[J]. Food Science, 2018, 39(6): 7−12.]
[15] 陈晗, 杨悠悠, 赵青余, 等. SPE-HPLC-UV 法测定绞股蓝提取物中皂苷的含量[J]. 中国饲料, 2024(3): 125−129. [CHEN Han, YANG Youyou, ZHAO Qingyu, et al. Determination of saponins in *Gynostemma pentaphyllum* extract by SPE-HPLC-UV[J]. China Feed, 2024(3): 125−129.]
[16] 魏佳仪, 禄璐, 张渌洵, 等. 枸杞根黄酮提取工艺优化及其体外抗氧化、降血糖活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 243−250. [WEI Jiayi, LU Lu, ZHANG Lutao, et al. Extraction process optimization of flavonoids from *Lycium barbarum* root and its antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 243−250.]
[17] 张欣, 孙敬蒙, 贾珍珍, 等. 叶黄素复合纳米颗粒的制备工艺优化及其稳定性和抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 102−113. [ZHANG Xin, SUN Jingmeng, JIA Zhenzhen, et al. Optimization of lutein complex nanoparticle preparation process and analysis of stability and antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 102−113.]
[18] 胡夏恬, 张凤清, 于敏. 苦丁皂苷 D 的分离纯化及其纳米粒的制备表征[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 15−20. [HU Xiatian, ZHANG Fengqing, YU Min. Separation and purification of kudinoside D and its nanoparticle preparation and characterization [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 15−20.]
[19] HOSSEINI F, MIRI M A, NAJAFI M, et al. Encapsulation of rosemary essential oil in zein by electrospinning technique[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(9): 4070−4086.
[20] 王威振, 杨盼盼, 逯永瑞, 等. 龙牙百合多糖的超声辅助提取及其抗氧化、降血脂活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 251−257. [WANG Weizhen, YANG Panpan, TI Yongrui, et al. Ultrasound-assisted extraction and analysis of antioxidation and hypolipidemia activities of polysaccharides from *Lilium brownii* var. *viridulum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 251−257.]
[21] 何旭华, 石志娇, 王安娜, 等. 黑果腺肋花楸叶黄酮的提取工艺优化及抗氧化、结合胆酸盐能力分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 253−260. [HE Xuhua, SHI Zhijiao, WANG Anna, et al. Optimization of extraction process of flavonoids from *Aronia* melanocarpas' leaves and analysis of their antioxidant and bile salt binding capacity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 253−260.]
[22] 冯丹丹, 胡萍, 许浩翔, 等. 乳酸菌发酵刺梨汁体外降血糖、降血脂活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 212−219. [FENG Dandan, HU Ping, XU Haoxiang, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic activities of *Rosa roxburghii* juice fermented by lactic acid bacteria *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 212−219.]
[23] CHEN Juncheng, ZHANG Xia, HUO Da, et al. Preliminary characterization, antioxidant and α-glucosidase inhibitory activities of polysaccharides from *Mallotus furetianus*[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 215: 307−315.
[24] 贾珍珍. 叶黄素三元复合纳米粒的制备及评价[D]. 长春: 长春中医药大学, 2023. [JIA Zhenzhen. Preparation and evaluation of lutein ternary composite nanoparticles[D]. Changchun: Changchun University of Chinese Medicine, 2023.]
[25] ZHANG Xiaonan, GUO Tianqi, LIU Xiongjun, et al. Anti-solvent precipitation for the preparation of nobiletin nano-particles under ultrasonication-cis/reverse homogenization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106433.
[26] 冯子奇, 刘佳莹, 桑梅, 等. 反溶剂法制备叶黄素酯纳米粒[J]. 中草药, 2017, 48(14): 2870−2876. [FENG Ziqi, LIU Jiaying, SANG Mei, et al. Optimization of preparation, characterization, and dissolution characteristics of lutein ester nanoparticles by anti-solvent method[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2017, 48(14): 2870−2876.]
[27] 李媛, 傅玉颖, 李泽亚, 等. 乳清分离蛋白纤维-多糖复合纳米颗粒负载 β-胡萝卜素特性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 25−32. [LI Yuan, FU Yuying, LI Zeya, et al. Studies on characteristic of β-carotene loaded by whey protein nanofibrils-polysaccharide composite nanoparticles[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(12): 25−32.]
[28] AN J J, LIU M Z, DIN Z U, et al. Toward function starch nanogels by self-assembly of polysaccharide and protein: From synthesis to potential for polyphenol delivery[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 247: 125697.
[29] 梁洛丹, 曹伟伟, 李琳琳, 等. 蛋白质-多糖非共价及共价复合物包埋活性成分的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 368−376. [LIANG Luodan, CAO Weiwei, LI Linlin, et al. Research progress in encapsulation of bioactive compounds in protein-polysaccharide non-covalent and covalent complexes[J]. Food Science, 2023, 44(21): 368−376.]
[30] SALVI V R, PAWAR P. Nanostructured lipid carriers (NLC) system: A novel drug targeting carrier[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2019, 51: 255−267.

［31］ 尹琬婷, 李开鑫, 马玲君, 等. 负载辣椒素的巯基改性壳聚糖-玉米醇溶蛋白纳米颗粒制备与稳定性分析[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 8−14. ［YIN Wanting, LI Kaixin, MA Lingjun, et al. Preparation and stability analysis of capsaicin-loaded thiolated chitosan-zein nanoparticles[J]. Food Science, 2023, 44(10): 8−14.］

［32］ BELOQUI A, del POZO-RODRÍGUEZ A, ISLA A, et al. Nanostructured lipid carriers as oral delivery systems for poorly soluble drugs[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2017, 42: 144−154.

［33］ 郭静, 孙晓琳, 潘思轶. 环境因素对 β-胡萝卜素复合纳米粒子稳定性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 90−97. ［GUO Jing, SUN Xiaolin, PAN Siyi. Effect of environmental conditions on the stability of β-carotene nanoparticles[J]. Food Science, 2022, 43(16): 90−97.］

［34］ ROCHA S, PROENÇA C, ARAÚJO A N, et al. Flavonoids as potential modulators of pancreatic lipase catalytic activity[J]. Pharmaceutics, 2025, 17(2): 163.

［35］ JOAQUÍN N H, GEMA C H, GUILLERMO R, et al. The hydrolysis of saponin-rich extracts from fenugreek and quinoa improves their pancreatic lipase inhibitory activity and hypocholesterolemic effect[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128113.

［36］ CHEN Ling, LÜ Yuan, WANG Xiaoyong, et al. Impact of partial enzymatic hydrolysis on the transport and uptake of SPI nanoparticles post-digestion[J]. Food Hydrocolloids for Health, 2025, 7: 100223.

［37］ DING Mengzhen, HUANG Zixin, HUANG Zhiji, et al. Proteins from different sources in a high-fat food matrix influence lipid hydrolysis through bolus coalescence and interactions with bile salts[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108748.

［38］ 邓志汇, 黄惠华. 茶鲜叶和茶花水提液对胆酸盐的结合及其降血脂机理的研究[J]. 食品科学, 2011, 32(19): 96−99. ［DENG Zhihui, HUANG Huihua. Bile salt-binding capacity and lipid-lowering mechanisms of water extracts from fresh tea leaves and tea flowers[J]. Food Science, 2011, 32(19): 96−99.］

［39］ XIAO Manyu, LI Si, PEI Wenjing, et al. Natural saponins on cholesterol-related diseases: Treatment and mechanism[J]. Phytotherapy Research, 2025, 39(3): 1292−1318.

［40］ 王昱文, 段涵怡, 董悦君, 等. 黄芩黄酮的微波-超声法提取及降胆固醇活性评价[J]. 饲料工业, 2023, 44(11): 98−104. ［WANG Yuwen, DUAN Hanyi, DONG Yuejun, et al. Microwave-ultrasound extraction of flavonoids from *Scutellaria baicalensis* and the activity evaluation of cholesterol-lowering function *in vitro*[J]. Feed Industry, 2023, 44(11): 98−104.］

［41］ BLASCHEK W. Natural products as lead compounds for sodium glucose cotransporter (SGLT) inhibitors[J]. Planta Medica, 2017, 83(12/13): 985−993.

［42］ 王晓艺, 申学建, 张大虎, 等. 玫瑰多酚-壳聚糖纳米粒的制备及其抗氧化、降血糖活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 62−69. ［WANG Xiaoyi, SHEN Xuejian, ZHANG Dahu, et al. Preparation of rose polyphenol-chitosan nanoparticles and their antioxidation and hypoglycemic activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 62−69.］