

曲文鑫, 刘荣. 茶树菇多糖与石榴皮多酚复合物的稳定性及降脂作用 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 391–399. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070036

QU Wenxin, LIU Rong. Stability and Lipid-lowering Effect of the Complex of *Agrocybe cylindracea* Polysaccharides and Pomegranate Peel Polyphenols[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 391–399. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070036

· 营养与保健 ·

# 茶树菇多糖与石榴皮多酚复合物的稳定性及降脂作用

曲文鑫<sup>1</sup>, 刘荣<sup>1,2,\*</sup>

(1. 东北林业大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:**目的: 探究茶树菇多糖 (*Agrocybe cylindracea* polysaccharide, ACP) 与石榴皮多酚 (Pomegranate peel polyphenols, PPP) 提取物的复合物的稳定性, 并研究其结构以及二者是否具有协同降脂作用。方法: 在前期试验的基础上, 获得了茶树菇多糖和石榴皮多酚的提取物, 进行定量分析, 通过非共价作用制备复合物, 对复合物 ACP-PPP 进行结构表征、稳定性试验, 并检测其单一组分及其复合物对饱和脂肪、不饱和脂肪、胆固醇、胰脂肪酶的吸附能力, 通过 Chou-Talalay 联合指数 (CI), 分析二者是否具有协同降脂作用。结果: 光谱分析表明 ACP-PPP 复合物之间主要是氢键相互作用, 在复合物形成过程中并未形成新的双键。该复合物的热稳定性更好且溶解度更高。在不同光照、温度、pH、贮藏条件、消化体系的条件下, 复合物发生不同程度解离, 避光、低温、弱酸性的条件下有利于维持复合物的稳定。ACP 与 PPP 复合后饱和脂肪吸附量  $13 \pm 0.14$  g/g、不饱和脂肪吸附量  $8.73 \pm 0.53$  g/g、胆固醇吸附量  $74.8 \pm 1.23$  mg/g, 质量浓度为 1.2 mg/mL 时, 胰脂肪酶抑制率  $57.21\% \pm 1.32\%$ , 联合作用指数 CI 均小于 1, 具有良好协同降血脂作用。结论: 茶树菇多糖与石榴皮多酚复合后具有良好的稳定性和协同降脂效果。

**关键词:** 茶树菇多糖, 石榴皮多酚, 复合物稳定性, 结构表征, 协同降脂

中图分类号: TS209

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0391-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070036



本文网刊:

## Stability and Lipid-lowering Effect of the Complex of *Agrocybe cylindracea* Polysaccharides and Pomegranate Peel Polyphenols

QU Wenxin<sup>1</sup>, LIU Rong<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Key Laboratory of Forest Food Resources Utilization of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Objective: To examine the structure and potential synergistic lipid-lowering effects of the complex of pomegranate peel polyphenols (PPP) and *Agrocybe cylindracea* polysaccharide (ACP) extracts, as well as the stability of the mixture. Methods: Based on the previous experiments, extracts of *Agrocybe cylindracea* polysaccharides and pomegranate peel polyphenols were obtained, subjected to quantitative analysis, and non-covalent interaction was used to generate the complexes. The adsorption capacities of the single components and their complexes on saturated fats, unsaturated fats, cholesterol, and pancreatic lipase were assessed using the Chou-Talalay combination index (CI) to determine whether synergistic lipid-lowering effects were exhibited between single components and complexes. Structural characterization and stability tests of the complexes ACP-PPP were also performed. Results: The primary contacts between the ACP-PPP complexes were revealed by spectroscopic investigations to be hydrogen bonding interactions. No additional

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500307-07)。

作者简介: 曲文鑫 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1406166966@qq.com。

\* 通信作者: 刘荣 (1971-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品营养与功能性食品, E-mail: lrwxh123@163.com。

double bonds were created during the complex building process. The complex had greater solubility and thermal stability. It was advantageous to preserve the stability of the complex under the conditions of light avoidance, low temperature, and mild acidity. The complex dissociated to varying degrees under varied parameters of light, temperature, pH, storage settings, and digesting system. When ACP was combined with PPP, the amount of saturated fat that was adsorbed was  $13 \pm 0.14$  g/g, the amount of unsaturated fat that was adsorbed was  $8.73 \pm 0.53$  g/g, the amount of cholesterol that was adsorbed was  $74.8 \pm 1.23$  mg/g, and at a mass concentration of 1.2 mg/mL, the inhibition rate of pancreatic lipase was  $57.21\% \pm 1.32\%$ . Following the complexation of ACP and PPP, the CI value of each assessment index was less than 1, including a good synergistic lipid-lowering ability. Conclusion: *Agrocybe cylindracea* polysaccharide and pomegranate peel polyphenols have good stability and synergistic hypolipidemic effect after compounding.

**Key words:** *Agrocybe cylindracea* polysaccharide; pomegranate peel polyphenols; complex stability; structural characterisation; synergistic lipid-lowering

由于生活方式和饮食习惯的改变,肥胖、糖尿病、脂肪肝、高脂血症等糖脂代谢性疾病的患病率在全球呈现快速上升趋势,这类疾病的预防和治疗已成为 21 世纪的主要公共卫生问题<sup>[1]</sup>。人体内脂质积累过多会导致脂质代谢紊乱,进而导致肥胖、非酒精性脂肪性肝炎和其他代谢性疾病<sup>[2]</sup>。临床上治疗的药物主要有他汀类化学药品,治疗初期效果显著,但一部分患者对这一类药物并不耐受,而且还会产生副作用<sup>[3-4]</sup>。因此开发天然低价的降脂食品已成为食品领域的热门话题。

茶树菇(*Agrocybe cylindracea*)是一种珍贵的食药兼用真菌,原产于闽西北。营养丰富、味道鲜美,受到了广大消费者的一致好评<sup>[5]</sup>。茶树菇多糖(*Agrocybe cylindracea* polysaccharide, ACP)是其主要活性成分之一,具有抗氧化、降血脂、抗肿瘤、抗炎等多种功能特性<sup>[6-8]</sup>。徐峻等<sup>[9]</sup>采用茶树菇多糖评价小鼠高脂模型,结果表明,茶树菇多糖在高脂模型组中的降脂效果更为突出。

石榴(*Punica granatum* L.),千屈菜科石榴属植物,原产于巴尔干半岛至伊朗及其邻近地区。酸甜可口,具有丰富的氨基酸、维生素、纤维素、矿物质等营养物质<sup>[10]</sup>。在石榴的加工过程中,大部分的石榴皮被当作饲料、肥料简单处理,或直接丢弃,造成了极大的浪费。而天然多酚是石榴皮中的功能成分之一。酚类化合物可在一定程度上抑制脂质的消化,并在肠道内吸附胆酸盐和减少脂肪的吸收,使机体保持健康<sup>[11]</sup>。ZHAO 等<sup>[12]</sup>采用体外 HL7702 脂肪变性肝细胞模型评估石榴皮多酚及其他一些植物多酚的生物活性,表明石榴皮多酚具有较强的降脂作用。

多糖主要通过吸附胆固醇和甘油三酯,防止其在消化过程中被吸收<sup>[13]</sup>。多酚类物质调节脂质代谢的机制主要是通过改善肠道微生物群,抑制胰脂肪酶活性、促进膳食脂肪的氧化、减少机体对外源性脂类的吸收、增加排泄量及能量输出,抑制脂肪生成相关基因的表达、促进脂肪分解及能量代谢相关基因的表达,并通过提高高密度脂蛋白(HDL)水平和自身抗氧化作用减少脂类沉积<sup>[14]</sup>。在食品加工过程中,多糖与多酚的相互作用往往不可避免,它们之间可以通

过非共价和共价作用发生结合,在多糖与多酚的非共价作用中主要涉及氢键作用、疏水作用、范德华力等,诱导它们之间形成非共价复合物<sup>[15]</sup>。而通过共价作用形成的复合物主要依靠自由基反应、缩合反应等<sup>[16]</sup>。当多糖与多酚复合后,由于结构和物理性质的改变,其功能也会发生相应的变化。复合物虽然提高了多酚的溶解性和稳定性但却降低了多糖溶液的粘度<sup>[17]</sup>,因此多糖与多酚复合物的功能特性和生物活性需要综合考虑。目前,协同作用相关研究主要以抗氧化<sup>[18]</sup>、降血糖<sup>[19]</sup>为主,对于协同降脂方面的研究鲜有报道。因此本试验基于多糖与多酚非共价相互作用,考察茶树菇多糖和石榴皮多酚单一组分及其复合物的理化性质、功能效果,为降血脂功能食品的开发利用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

茶树菇多糖(多糖含量 61.2%)、石榴皮多酚(多酚含量 61.5%) 实验室自制;猪油、大豆油 市售,购于哈尔滨市;浓硫酸、浓盐酸 国药集团化学试剂有限公司;无水乙醇、氢氧化钠、冰乙酸、胆固醇、PBS 磷酸盐缓冲液、甘氨酸胆酸钠、胰脂肪酶(20000 U/g)、胃蛋白酶(30000 U/g)、透析袋(截留分子量 1000 Da) 人工唾液、人工胃液、人工小肠液 上海源叶生物科技有限公司;以上试剂均为分析纯。

ELx800 NB 型酶标仪 美国 BioTek 公司;722 可见分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司;HHS-22-8 电热恒温水浴锅 上海博讯实业有限公司;TDL-5 台式离心机 上海科兴仪器有限公司;DHG-9240 电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司;YP2001N 电子天平 上海精天电子仪器厂。

### 1.2 实验方法

1.2.1 茶树菇多糖提取工艺 参照胡晓倩等<sup>[20]</sup>的研究方法,采用水提醇沉法提取多糖。取新鲜茶树菇,去除杂质,洗净烘干研磨成粉末。取 10 g 茶树菇粉末置于 1 L 烧瓶中,加入 500 mL 蒸馏水,70 ℃ 下浸提 3 h,过滤得滤液。旋转蒸发至原体积 1/5,Sevage 法脱除蛋白,重复多次至无明显白色沉淀,加入 3 倍体积无水乙醇静置一晚。沉淀溶于水,透析 72 h 冻

干备用。

**1.2.2 石榴皮多酚提取工艺** 参照左栖枫等<sup>[21]</sup>研究方法稍作修改,新鲜石榴手工剥皮,将皮切成小块后放入 50 ℃ 烘箱烘干,研磨成粉末。称取 5 g 石榴皮粉末于圆底烧瓶中,加入 150 mL 蒸馏水,在 70 ℃ 恒温水浴锅中提取 1 h,重复两次,将两次提取液混合后旋蒸得到粗提液。粗提液装入预先处理好的 AB-8 大孔树脂分离纯化,纯化后的石榴皮多酚冷冻干燥备用。

**1.2.3 ACP-PPP 复合物的制备** 参照 LI 等<sup>[22]</sup>的研究方法制备茶树菇多糖-石榴皮多酚(ACP-PPP)复合物,稍作修改。根据预实验研究结果,以结合量为评价指标,探究质量比、pH、温度对复合物制备的影响,结果表明复合物在质量比为 1:1、25 ℃、中性的条件下结合率最高,ACP 的 PPP 结合量达 165 mg/g。因此将 ACP 水溶液和 PPP 水溶液按一定比例混合,常温搅拌 30 min,搅拌结束后取 10 mL 混合液转移至预先处理好的透析袋(1000 Da),直至透析平衡,最后将透析袋内的溶液冷冻干燥,获得 ACP-PPP 复合物。

**1.2.4 ACP-PPP 复合物的结构表征**

**1.2.4.1 傅里叶变换红外光谱分析** 参考陈燕云等<sup>[23]</sup>的方法:分别称取 5 mg ACP、PPP 和 ACP-PPP 样品与 KBr 混合均匀压片后,在 4000~500 cm<sup>-1</sup> 波长范围内进行扫描分析,扫描次数 64 次,分辨率 4 cm<sup>-1</sup>。

**1.2.4.2 紫外-可见光谱分析** 参考姜荣华等<sup>[24]</sup>的方法:配制质量浓度为 1 mg/mL 的 ACP、PPP 和 ACP-PPP 样品溶液,稀释 20 倍,以蒸馏水建立基线,在波长为 200~600 nm 进行紫外光谱扫描。

**1.2.4.3 热重分析** 参照邢慧珍等<sup>[25]</sup>的方法:分别称取 5 mg ACP、ACP-PPP 样品,放入托盘中,托盘边缘不能有余留,通过热重分析仪在氮气环境中测定样品的热特性,温度范围 30~600 ℃,升温速度 10 ℃/min。

**1.2.4.4 X-射线衍射分析** 参照马婷等<sup>[26]</sup>的方法:采用 X 射线衍射仪在电压 40 kV,电流 40 mA,2 $\theta$ =5°~90°范围内测定 ACP 和 ACP-PPP 样品的 X 射线衍射强度。

**1.2.5 ACP-PPP 复合物稳定性试验**

**1.2.5.1 热稳定性** 参照刘秋兰等<sup>[27]</sup>的研究方法,稍作修改,在 1000 Da 的透析袋中,分别放入 10 mL 的复合物水溶液(4 mg/mL),浸没在 190 mL 的蒸馏水中,并在 0、25、37、100 ℃ 水浴透析 4 h,以进行热稳定性评价,于波长 765 nm 处,酶标仪测定透析外液中多酚的吸光度,得到其浓度后按 200 mL 总体积计算多酚的保留率,保留率按公式(1)计算。

$$D(\%) = \left(1 - \frac{m_1}{m_2}\right) \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: D 为多酚的保留率,%;  $m_1$  为透析外液中游离多酚的质量,mg;  $m_2$  为复合物中多酚的质量,mg。

**1.2.5.2 消化稳定性** 参照刘秋兰等<sup>[27]</sup>的研究方法,分别取 10 mL 唾液、胃、肠道模拟消化液与三份 10 mg ACP-PPP 复合物于离心管中,150 r/min 摇床 37 ℃ 恒温孵育 2 h 后,将混合液装入透析袋中,透析 4 h。于波长 765 nm 处,酶标仪测定透析外液中游离多酚的吸光度,计算多酚的保留率,保留率按公式(1)计算。

**1.2.5.3 光稳定性** 参照苏宁等<sup>[28]</sup>研究方法稍作修改,将 ACP-PPP 复合物(1 mg/mL)分别置于室内避光、室内自然光、直射太阳光的条件下,每隔 5 d 测定多酚含量,连续测定 25 d,计算多酚保留率,保留率按公式(2)计算。

$$D(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: D 为多酚的保留率,%;  $m_1$  为贮存一段时间后样品中多酚的质量,mg;  $m_2$  为贮存前样品中多酚的质量,mg。

**1.2.5.4 pH 稳定性** 参照何袅袅等<sup>[29]</sup>研究方法稍作修改,用 1 mol/L HCl 和 0.5 mol/L NaOH 配成 pH 为 2、3、4、5、6、7、8、9、10 的溶液,加入适量样品溶液,避光静置 24 h,测定多酚含量,计算多酚保留率,保留率按公式(2)计算。

**1.2.5.5 贮藏稳定性** 参照穆谈航等<sup>[30]</sup>研究方法,将 ACP-PPP 复合物(1 mg/mL)分别置于室温避光条件下和 4 ℃ 冰箱内贮藏,每隔 5 d 测定多酚含量,连续测定 25 d,计算多酚保留率,保留率按公式(2)计算。

**1.2.6 体外降脂活性测定**

**1.2.6.1 油脂吸附试验** 参照雷丹等<sup>[31]</sup>的研究方法,准确称取 1 g ACP、PPP、ACP-PPP 样品置于烧杯中,分别加入 20 mL 饱和脂肪/不饱和脂肪混合均匀,加入 10 mL pH2 盐酸溶液,于 37 ℃ 恒温振荡 1 h,离心去上层油脂,滤纸吸干残渣游离脂肪,称重,根据公式(3)计算样品对油脂的吸附量。

$$Q(g/g) = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \quad \text{式 (3)}$$

式中: Q 为油脂的吸附量,g/g;  $m_1$  为所用油的质量,g;  $m_2$  为游离油的质量,g;  $m_3$  为样品的质量,g。

**1.2.6.2 胆固醇吸附试验** 参照 LI 等<sup>[32]</sup>的研究方法稍作修改,准确称取 0.1 g ACP、PPP、ACP-PPP 样品分别加入 20 mL 0.2 mg/mL 胆固醇溶液混合,恒温静置 150 min,取 0.2 mL 上清液加入 0.4 mL 邻苯二甲醛溶液(1 mg/mL)、0.6 mL 冰乙酸、8 mL 混合酸( $V_{\text{浓硫酸}}:V_{\text{冰乙酸}}=1:1$ ),37 ℃ 水浴 15 min,最终于 550 nm 波长检测样本吸光度。以吸光度为纵坐标 y 绘制标准曲线, $y=1.2x+0.0395$ , $R^2=0.9921$ ,求出胆

固醇的浓度,胆固醇吸附能力根据公式(4)计算。

$$\text{吸附量}(\text{mg/g}) = \frac{V \times (C_0 - C_1)}{m} \quad \text{式(4)}$$

式中:  $V$  为胆固醇溶液的体积, mL;  $m$  为样品质量, g;  $C_1$  为吸附后胆固醇溶液的浓度, mg/mL;  $C_0$  为吸附前胆固醇溶液的浓度, mg/mL。

**1.2.6.3 胰脂肪酶抑制试验** 参照王威振等<sup>[33]</sup>研究方法稍作修改,取若干锥形瓶,加入 5 mL pH 为 7.5 的 0.025 mol/L 的 PBS,将其与 1 mL 大豆油乳化液于 40 °C 预热 5 min,剧烈振荡后,取 4 mL 乳化液加入 1 mL 0.02 g/mL 胰脂肪酶,用蒸馏水代替样品溶液做空白对照,抑制管分别加入不同浓度 ACP、PPP、ACP-PPP 溶液(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mg/mL)保温 5 min,取出后立即加入 15 mL 95% 乙醇,终止酶反应。加入 3 滴酚酞指示剂,用 0.025 mol/L NaOH 滴定溶液至粉红色为止,记录氢氧化钠消耗量。胰脂肪酶活性抑制率按公式(5)计算。

$$X(\%) = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中:  $X$  为胰脂肪酶酶活抑制率, %;  $V_0$  为空白对照组所消耗 NaOH 的体积, mL;  $V$  为加入样品实验组所消耗 NaOH 的体积, mL。

**1.2.7 联合指数(CI)** 为了确定 ACP 与 PPP 联合降脂作用是协同还是拮抗,参照 Talady 和 Chou 的中效原理联合作用指数 CI,当  $CI < 1$  时,表明二者具有协同作用,反之当  $CI > 1$  时,表明二者具有协同作用,如果  $CI = 1$ ,表明二者具有加合作用<sup>[34-35]</sup>。利用 CI 来量化两种物质的相互作用,按公式(6)计算。

$$CI = \frac{D_1}{D_{x1}} + \frac{D_2}{D_{x2}} \quad \text{式(6)}$$

式中:  $D_1$ 、 $D_2$  为联合使用时产生清除率  $X$  两物质各自所需剂量;  $D_{x1}$ 、 $D_{x2}$  为两物质单独使用产生清除率  $X$  时所需的剂量。

### 1.3 数据处理

实验结果均为三次平行实验,以平均值±标准差( $\bar{X} \pm SD$ )表示,采用 Excel 2021、Origin 2021 进行实验数据的处理分析以及绘图。采用 IBM SPSS Statistics 25 进行差异性分析,  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合物的结构特征

**2.1.1 傅里叶变换红外光谱分析结果** 通过红外光谱可以获得多糖与多酚相互作用的结构信息。图 1 为 ACP、PPP 与 ACP-PPP 复合物在 4000~500  $\text{cm}^{-1}$  频率范围内的红外光谱吸收情况。ACP 在 3280  $\text{cm}^{-1}$  和 2890  $\text{cm}^{-1}$  处出现特征峰代表 O-H 伸缩振动和 C-H 伸缩振动。1640  $\text{cm}^{-1}$  处附近的吸收峰代表 C=O 发生对称、非对称伸缩振动,1360  $\text{cm}^{-1}$  处附近的吸收峰为糖醛酸中羰基的特征吸收峰,

1150  $\text{cm}^{-1}$  处对应吡喃糖环的吸收峰,999  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰表明 ACP 具有  $\alpha$  类型的糖苷键<sup>[36]</sup>。PPP 具有酚羟基(3277  $\text{cm}^{-1}$ )、亚甲基(2870  $\text{cm}^{-1}$ )、羰基(1710  $\text{cm}^{-1}$ )、苯环(1510  $\text{cm}^{-1}$ )特征吸收峰<sup>[37]</sup>。复合物形成后 O-H 和 C-H 发生移动,分别移至 3300  $\text{cm}^{-1}$  和 2910  $\text{cm}^{-1}$ ,表明 ACP 与 PPP 发生了强烈的氢键反应,在 1700~500  $\text{cm}^{-1}$  范围内,复合物 ACP-PPP 保留了多糖和多酚某些特征吸收峰,但峰强度和位置发生了一定的变化,表明二者之间具有相互作用<sup>[38]</sup>。复合物 ACP-PPP 未出现新的特征峰,说明复合物 ACP-PPP 复合物之间主要是氢键相互作用。

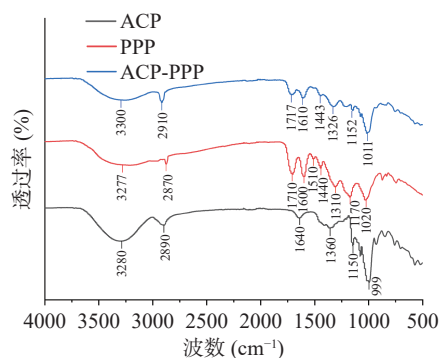


图 1 ACP、PPP、ACP-PPP 的红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of ACP, PPP, ACP-PPP

**2.1.2 紫外光谱分析结果** ACP、PPP 与复合物 ACP-PPP 的紫外光谱如图 2 所示, ACP 在 260~280 nm 波长范围内没有吸收峰,表明 ACP 几乎不含蛋白质与核酸。多酚结构中含有一个或多个苯环和不同数量双键、羰基,吸收峰主要存在 200~380 nm 范围内。PPP 的特征峰出现在 203 nm( $\pi-\pi^*$  苯环的跃迁)、275 nm( $\pi-\pi^*$  酚基的跃迁)。该特征峰也出现在复合物 ACP-PPP 的光谱中,但特征峰相对较弱,表明复合物形成的过程中没有形成新的双键。这与 LI 等<sup>[22]</sup>研究发现多糖与多酚通过非共价键结合,复合物的特征峰在紫外光谱中消失或减弱的研究结果一致。

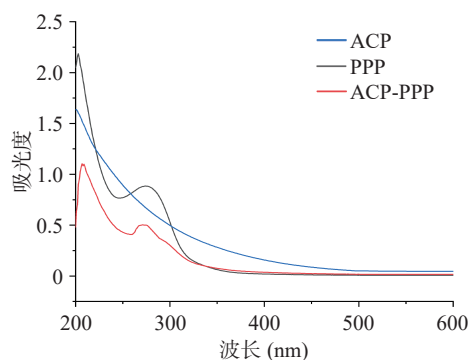


图 2 ACP、PPP、ACP-PPP 的紫外光谱图

Fig.2 UV spectra of ACP, PPP, ACP-PPP

**2.1.3 热重分析结果** ACP 与 ACP-PPP 在 30~600 °C 时的热重分析结果如图 3 所示。多糖的质量

损失大致分为三个阶段,第一阶段:在 30~250 ℃ 范围内,ACP 的质量损失约为 12%,这是由于 ACP 结构中氢键水分的解吸,会发生少量重量的损失。第二阶段:在 250~350 ℃ 范围内,ACP 质量剧烈降低至 22%,质量损失约为 67%,这是由于高温使得多糖降解而使得质量大幅度损失。第三阶段:在 350~600 ℃ 范围内,多糖失重率逐渐趋于缓慢,质量损失约为 11%。复合物 ACP-PPP 的质量损失也分为三个阶段,第一阶段:在 30~250 ℃ 范围内仍然为水分子的损失阶段,质量损失约为 11%。第二阶段:在 250~300 ℃ 范围内,质量继续降低至 61%,但失重率明显低于 ACP 的第二阶段。第三阶段:在 300~600 ℃ 范围内,质量损失约为 23.7%。通过比较 ACP 与 ACP-PPP 的 TG 曲线,可以得出随着温度的不断升高,ACP-PPP 在 250~350 ℃ 期间由于热分解引起的质量损失明显低于 ACP,由此表明 ACP 与 PPP 复合后的热稳定性更强。

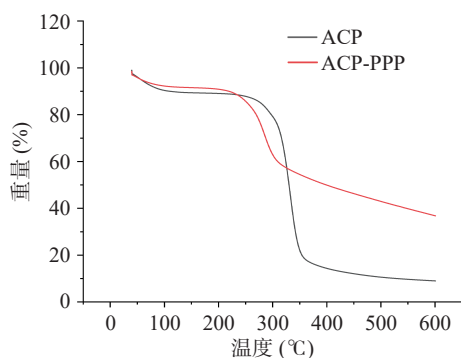


图 3 ACP 和 ACP-PPP 的热重分析曲线  
Fig.3 Thermogravimetric analysis curves for ACP and ACP-PPP

2.1.4 X-射线衍射分析结果 XRD 通常用于复合物形成后表征分子晶体结构的一种方法<sup>[39]</sup>。ACP 与 ACP-PPP 的 X-衍射图谱如图 4 所示,在  $2\theta=17.89^\circ$  左右 ACP 有一个“面包形”晶体反射,衍射峰宽而弥散,说明 ACP 主要以非定形的结晶态存在,而多糖与多酚复合后在  $2\theta=20^\circ$  左右,衍射峰更加宽而弥散,表明复合物的结晶度小于单一多糖,主要以无定形、高度均匀的状态存在。这一构造可以增加其水溶性

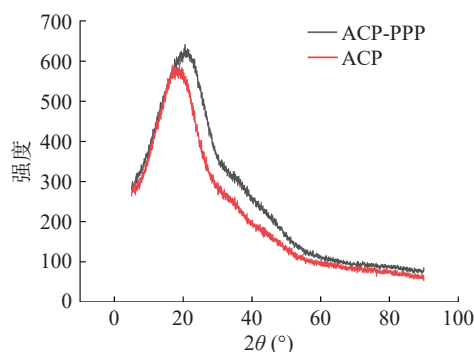


图 4 ACP 和 ACP-PPP 的 X-射线衍射图谱  
Fig.4 X-ray diffraction patterns of ACP and ACP-PPP

和在食品体系中的溶解度,最终提高其生物利用率。

## 2.2 稳定性分析结果

2.2.1 热稳定性分析结果 在食品加工及运输过程中,多糖和多酚复合物的稳定性是重点需要考虑的问题,因此本研究测定 ACP-PPP 复合物分别在 0、25、37、100 ℃ 下 PPP 的解离率。结果如图 5 所示,在 0 ℃ 时复配物最稳定,多酚保留率为 98.27%,随着温度的不断升高,保留率显著下降( $P<0.05$ ),在温度为 100 ℃ 时,保留率下降至 45.01%,这是由于在高温的条件下,氢键的稳定性会受到影响,导致氢键变弱,复合物大幅度发生解离。

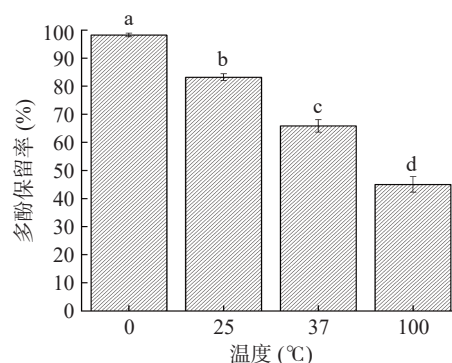


图 5 ACP-PPP 在不同温度下的解离率

Fig.5 Dissociation rates of ACP-PPP at different temperatures  
注:不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ ),图 6~图 12 同。

2.2.2 消化稳定性分析结果 在模拟哺乳动物胃肠道的条件下,单宁在肠道(pH7.4)发生分解,仅保留 10% 的起始物质。为考察复配物 ACP-PPP 在消化体系中的稳定性,采用模拟体外消化系统,将复配物置于口腔、胃、肠道消化液中,结果如图 6 所示出现了不同程度的解离,在口腔、胃、肠道的保留率分别为 85.3%、78.8%、72.2%,口腔中多酚保留率显著高于胃和肠道( $P<0.05$ )。在肠道中的稳定性最差、解离率最高,这可能是由于肠道中胰酶的影响,导致复配物不稳定,也表明 ACP 与 PPP 结合有助于 PPP 在消化道上的缓慢释放<sup>[27]</sup>。这与邹晓琴等<sup>[40]</sup>模拟体外消化系统,将复合物置于口腔、胃、肠道三种电解质溶液中,复合物在肠道中的稳定性最差,分别是口腔和胃中解离率的 1.25 倍和 1.78 倍的研究结果

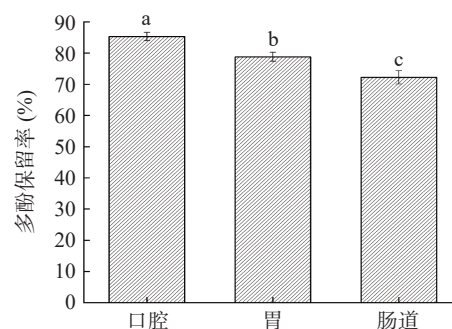


图 6 ACP-PPP 的消化稳定性

Fig.6 Digestive stability of ACP-PPP

一致。

**2.2.3 光稳定性分析结果** 多酚类物质容易氧化对光极不稳定。如图7所示,测定 ACP-PPP 复合物在不同光照条件下的多酚保留率。可以看出经不同光照处理后的 ACP-PPP 复合物中 PPP 的含量呈现出不同程度的下降趋势,说明复合物中的 PPP 大量降解。室内避光、室内自然光、直射太阳光连续 25 d 后,多酚保留率分别下降至 81.39%、62.01%、41.85%,这可能是由于在光照的条件下,复合物中的多酚发生降解和异构化,改变了复合物的结构<sup>[41]</sup>。因此复合物 ACP-PPP 应当避光保存。

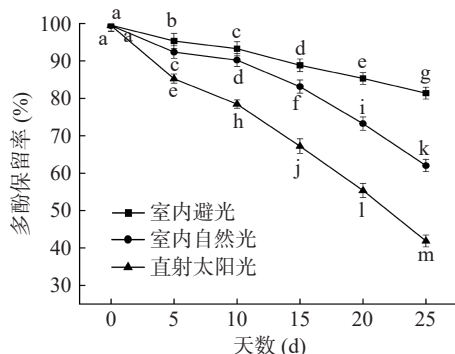


图7 ACP-PPP 不同光照条件下的稳定性

Fig.7 Stability of ACP-PPP under different light conditions

**2.2.4 pH 稳定性分析结果** 如图8所示,不同 pH 对 ACP-PPP 复合物的稳定性均有一定影响。随着 pH 的升高,多酚保留率呈先上升后下降趋势,在酸性条件下的稳定性优于碱性环境。在 pH 为 5 时,多酚保留率达到最大值,为 98.75%,当 pH 为 6~10,多酚保留率显著下降( $P<0.05$ )。出现这种现象可能是由于 ACP-PPP 复合物含有大量酚羟基,呈弱酸性,在酸性环境条件下比较稳定,有利于氢键的形成。在碱性条件下容易被破坏,因此多酚保留率大幅度下降。这与干建松<sup>[42]</sup>研究发现在酸性条件下,荸荠皮多酚较稳定,而在碱性环境中多酚浓度迅速下降研究结果一致。同时这也对研究多糖与多酚的稳定结合也具有重要指导意义。

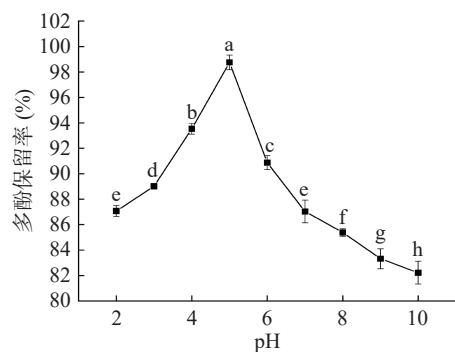


图8 ACP-PPP 在不同 pH 条件下的稳定性

Fig.8 Stability of ACP-PPP under different pH conditions

**2.2.5 贮藏稳定性分析结果** 评估复合物的稳定性时,贮藏稳定性是一个关键指标。如图9所示,ACP-

PPP 在不同贮藏条件下,PPP 含量发生不同的变化。可以观察到在两种贮藏条件下 PPP 含量在 10 d 内没有显著的变化,表明复合物在贮藏 10 d 内比较稳定。10 d 后复合物受温度的影响发生氧化,开始不同程度的分解,多酚保留率降低。贮藏 25 d 后,4 °C 冰箱贮藏条件下的多酚保留率降低至 89% 左右,室温避光贮藏下的多酚保留率降低至 81% 左右。这是由于低温分子间运动较慢,更有利于氢键的形成<sup>[43]</sup>,这与上述光稳定性试验结果一致。表明了复合物更适合在低温、避光条件下贮藏。

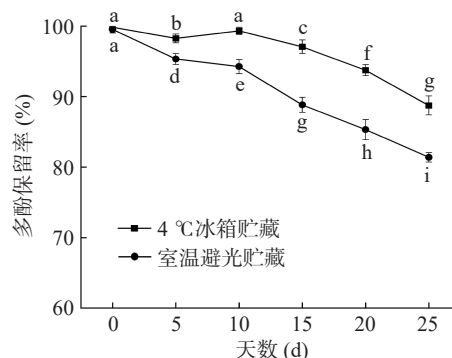


图9 ACP-PPP 在不同贮藏条件下的稳定性

Fig.9 Stability of ACP-PPP under different storage conditions

## 2.3 体外降脂活性研究结果

**2.3.1 对油脂的吸附能力分析** 食用菌多糖在胃肠中的粘性增加,吸收脂肪后会有饱足感,减少摄取的总能量,因此可以起到降脂的作用<sup>[44]</sup>。ACP、PPP、ACP-PPP 对油脂的吸附能力如图10所示,多糖对油脂的吸附作用显著高于多酚( $P<0.05$ ),复合物对油脂的吸附作用显著高于单一组分( $P<0.05$ )。单一组分及复合物对饱和脂肪的吸附作用要显著高于不饱和脂肪( $P<0.05$ ),这可能是由于二者结构具有一定差异,不饱和脂肪分子结构中双键电子云的空间位阻效果,导致对油脂的吸附量不同<sup>[45]</sup>。这与钟希琼等<sup>[46]</sup>研究发现麦麸纤维、米糠纤维、甘薯纤维对饱和油脂的吸附作用比不饱和油脂的吸附作用好的研究结果一致。

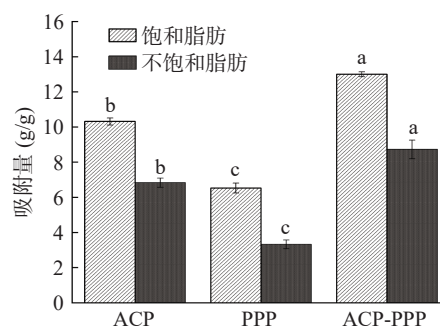


图10 ACP、PPP 以及 ACP-PPP 复合物的油脂吸附量

Fig.10 Adsorption of oils and fats by ACP, PPP and ACP-PPP complexes

**2.3.2 对胆固醇吸附能力分析** 胆固醇浓度或组分

发生异常,会导致慢性代谢紊乱疾病。有大量研究表明,食用菌多糖通过抑制总胆固醇合成途径,促进胆汁酸合成,调控脂代谢相关因子表达,减轻氧化应激反应和调节肠道功能等途径改善高脂血症的作用机制<sup>[47]</sup>。ACP、PPP、ACP-PPP 对胆固醇的吸附能力如图 11 所示, ACP-PPP 复合物对胆固醇的吸附量显著高于单一组分( $P<0.05$ ),相对于 ACP 和 PPP 吸附量分别提高了 29%、53.2%。由此结果可知, ACP 与 PPP 形成复合物,对胆固醇具有一定的吸附作用,从而减少胆固醇在体内的吸收,达到降脂的效果。

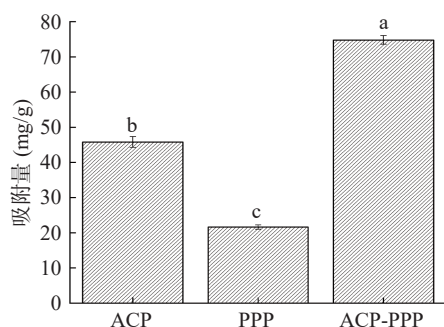


图 11 ACP、PPP 以及 ACP-PPP 复合物的胆固醇吸附量

Fig.11 Cholesterol adsorption by ACP, PPP and ACP-PPP complexes

2.3.3 对胰脂肪酶抑制能力分析 胰脂肪酶主要由胰腺腺泡细胞和胃细胞分泌,是膳食脂肪水解中重要的酶。它可以将甘油三酯和胆固醇水解成甘油单脂和脂肪酸,被小肠上皮细胞吸收。因此可以通过抑制胰脂肪酶活性,减少人体对于脂肪的水解和吸收,从而达到降脂目的<sup>[48]</sup>。如图 12 所示, ACP、PPP、ACP-PPP 对胰脂肪酶的抑制能力均呈上升后趋于平稳,在浓度为 1.2 mg/mL 时,对胰脂肪酶抑制率达到最大值,分别为  $43.88\%\pm1.89\%$ 、 $57.14\%\pm1.66\%$ 、 $57.21\%\pm1.32\%$ , ACP-PPP 对胰脂肪酶的抑制率接近于 PPP,但 ACP-PPP 的抑制率显著大于 ACP ( $P<0.05$ ),由此可见复合物的形成有利于提高多糖对于胰脂肪酶的抑制能力,具有潜在的降脂活性。

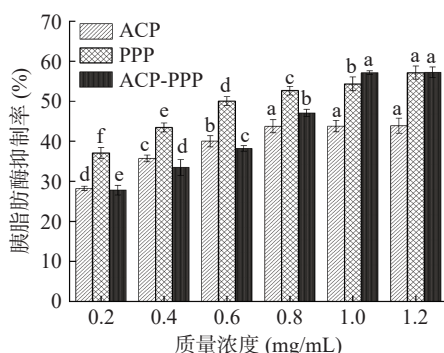


图 12 ACP、PPP 以及 ACP-PPP 对胰脂肪酶抑制率

Fig.12 Inhibition of pancreatic lipase by ACP, PPP, and ACP-PPP

## 2.4 联合指数分析 (CI)

根据 Chou 和 Talady 的中效原理计算油脂吸附

量、胆固醇吸附量、胰脂肪酶抑制率的联合作用指数 CI,  $CI_{\text{饱和脂肪}}=0.67\pm0.09$ 、 $CI_{\text{不饱和脂肪}}=0.78\pm0.13$ 、 $CI_{\text{胆固醇}}=0.44\pm0.08$ 、 $CI_{\text{胰脂肪酶}}=0.64\pm0.06$ , CI 值均小于 1,表明 ACP 与 PPP 复合后具有协同降脂作用。

## 3 结论

本研究采用非共价结合方式制备复合物 ACP-PPP,并对复合物的稳定性、结构特征和体外协同降脂活性能力进行了研究。光谱分析结果表明, ACP 与 PPP 形成复合物的分子间作用力主要是氢键,过程中并未形成其他的化学键。热重分析及 X-射线光谱显示, ACP-PPP 要比其单一组分具有更好的热稳定性和溶解性。稳定性试验结果表明复合物 ACP-PPP 在弱酸性、低温、避光的条件下更稳定,多酚不易分解。模拟体外消化结果表明 ACP 与 PPP 结合有助于 PPP 在消化道上的缓慢释放,极大地提高了多酚的生物利用率。通过中效原理计算油脂吸附量、胆固醇吸附量、胰脂肪酶抑制率的联合作用指数 CI 均小于 1,结果表明 ACP 与 PPP 复配后具有良好的协同降血脂作用。通过制备复合物大大地提高了 ACP 和 PPP 的生理功能及其生物利用度,也为后续开发天然、安全、高效的降脂食品和相关药物提供理论依据。

© The Author(s) 2025. 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] GILES L A. Hyperlipidemia prevention and management utilizing lifestyle changes[J]. *Journal of Midwifery & Women's Health*, 2024, 69(3): 361-369.
- [2] MURAKAMI, HIRAZAWA C, MIZUTANI T, et al. Edible red seaweed hypnea asiatica ameliorates high-fat diet induced metabolic diseases in mice[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2023, 26(11): 799-808.
- [3] ABDUL T, BUKHARI S M A, HERRERA E C, et al. Lipid lowering therapy: An era beyond statins[J]. *Current Problems in Cardiology*, 2022, 47(12): 101342.
- [4] PINAL I, CASAL M, MAMMEN A L. Statins: Pros and cons[J]. *Medicina Clínica (English Edition)*, 2018, 150(10): 398-402.
- [5] WANG H, NG T B, LIU Q. Isolation of a new heterodimeric lectin with mitogenic activity from fruiting bodies of the mushroom *agrocybe cylindracea* [J]. *Life Sciences*, 2002, 70(8): 877-885.
- [6] LIU J J, CHEN S K, WANG X, et al. Changes of the physico-chemical properties and structural characteristics of alkali-extracted polysaccharides from *agrocybe cylindracea* across the growth process[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(22): 12810-12821.
- [7] LIU M, JING H J, ZHANG J J, et al. Optimization of mycelia selenium polysaccharide extraction from *agrocybe cylindracea* sl-02 and assessment of their antioxidant and anti-ageing activities[J]. *PLoS One*, 2016, 11(8): e0160799.
- [8] 高雅倩, 马诗经, 林丽, 等. 茶树菇多糖提取工艺优化及抗氧

- 化活性研究[J]. 现代食品, 2022, 28(1): 200–204. [GAO Y Q, MA S J, LIN L, et al. Optimisation of the extraction process and antioxidant activity of polysaccharides from tea tree mushroom[J]. Modern Food, 2022, 28(1): 200–204.]
- [9] 徐峻, 方绍海, 辛英姬, 等. 应用茶树菇(As-1)多糖评价小鼠高脂模型的建立[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29): 16248–16249. [XU J, FANG S H, XIN Y J, et al. Application of tea tree mushroom (as-1) polysaccharide to evaluate the establishment of a mouse hyperlipidemic model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(29): 16248–16249.]
- [10] SINGH J, KAUR H P, VERMA A, et al. Pomegranate peel phytochemistry, pharmacological properties, methods of extraction, and its application: a comprehensive review[J]. ACS omega, 2023, 8(39): 35452–35469.
- [11] 闫晓越, 王子琦, 王桂林, 等. 石榴皮多酚提取研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(24): 79–80, 83. [YAN X Y, WANG Z Q, WANG G L, et al. Progress of pomegranate peel polyphenol extraction[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(24): 79–80, 83.]
- [12] ZHAO W, LI J, HE X Y, et al. *In vitro* steatosis hepatic cell model to compare the lipid-lowering effects of pomegranate peel polyphenols with several other plant polyphenols as well as its related cholesterol efflux mechanisms[J]. Toxicology Reports, 2014, 1: 945–954.
- [13] 殷伟伟, 张松. 食药真菌降血脂作用的研究及应用[J]. 菌物研究, 2006, 4(4): 5. [YIN W W, ZHANG S. Study and application of hypolipidemic effect of edible and medicinal fungi[J]. Journal of Fungal Research, 2006, 4(4): 5.]
- [14] 王素敏, 徐欢欢, 黄业伟, 等. 茶多酚的降脂作用及其机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(10): 219–224. [WANG S M, XU H H, HUANG Y W, et al. Progress in the study of lipid-lowering effect of tea polyphenols and its mechanism[J]. Food Research and Development, 2016, 37(10): 219–224.]
- [15] ZHU J F, ZHANG D X, TANG H Y, et al. Structure relationship of non-covalent interactions between phenolic acids and arabinan-rich pectic polysaccharides from rapeseed meal[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2597–2603.
- [16] KE C X, LI L. Modification mechanism of soybean protein isolate-soluble soy polysaccharide complex by egcg through covalent and non-covalent interaction: structural, interfacial, and functional properties[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139033.
- [17] 崔灵敏, 谢笔钧, 孙智达. 果胶与莲原花青素复合物理化性质及体外抑菌活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 60–66, 80. [CUI L M, XIE B J, SUN Z D. Physicochemical properties and *in vitro* antibacterial activity of pectin complexed with lotus vulgaris anthocyanin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(16): 60–66, 80.]
- [18] LI Z D, XIAO W H, XIE J H, et al. Isolation, characterization and antioxidant activity of yam polysaccharides[J]. Foods, 2022, 11(6): 800.
- [19] ZHAO X, FU Z, YAO M H, et al. Mulberry leaf polysaccharide ameliorates insulin resistance and a dipose deposition associated gut microbiota and lipid metabolites in high fat diet induced obese mice[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(2): 617–630.
- [20] 胡晓倩, 唐洪华, 程安阳. 茶树菇多糖提取及其抗氧化性能的研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(21): 4465–4468. [HU X Q, TANG H H, CHENG A Y. Extraction of polysaccharides from tea tree mushroom and its antioxidant properties[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(21): 4465–4468.]
- [21] 左栖枫, 张新明, 邓舒畅, 等. S-8大孔树脂纯化会理石榴皮中多酚的工艺研究[J]. 轻工科技, 2021, 37(2): 15–18. [ZUO Q F, ZHANG X M, DENG S C, et al. Process study on the purification of polyphenols from pomegranate peel in huili with s-8 macroporous resin[J]. Light Industrial Science and Technology, 2021, 37(2): 15–18.]
- [22] LI S, LI J S, ZHU Z Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: Preparation, interaction and identification[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126219.
- [23] 陈燕云, 平华, 高媛, 等. 黍稷麸皮多糖分离纯化、结构表征及抑菌活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 1–7. [CHEN Y Y, PING H, GAO Y, et al. Isolation and purification of polysaccharides from millet bran, structural characterisation and analysis of antibacterial activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 1–7.]
- [24] 姜荣华, 蒲铎文, 樊梓鸾, 等. 老山芹多糖的分离纯化、结构表征及体外降糖活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 113–118, 124. [XIAN R H, PU D W, FAN Z L, et al. Isolation and purification, structural characterisation and *in vitro* hypoglycemic activity of polysaccharides from cynodon grandiflorus[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 113–118, 124.]
- [25] 邢慧珍, 张玉梅, 刘会平, 等. 淡竹叶多糖的制备、热稳定性及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 86–96. [XING H Z, ZHANG Y M, LIU H P, et al. Preparation, thermal stability and antioxidant activity of polysaccharides from tempranillo leaves[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 86–96.]
- [26] 马婷, 曲航, 杨海龙. 提取方法对羊栖菜多糖理化性质及体外生物活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 259–268. [MA T, QU H, YANG H L. Influence of extraction methods on the physicochemical properties and *in vitro* bioactivity of polysaccharides from lamb's quarters[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(15): 259–268.]
- [27] 刘秋兰, 邹晓琴, 易阳, 等. 莲藕多糖和阿魏酸的非共价相互作用及其复合物特性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 26–36. [LIU Q L, ZOU X Q, YI Y, et al. Non-covalent interactions between lotus root polysaccharides and ferulic acid and their complex properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 26–36.]
- [28] 苏宁, 刘志明, 王海英. 桑叶多酚提取工艺优化及复配物比较研究[J]. 食品科技, 2024, 49(5): 178–186. [SU N, LIU Z M, WANG H Y. Optimisation of mulberry leaf polyphenol extraction process and comparative study of compounds[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 178–186.]
- [29] 何袅袅, 蔡树芸, 阎光宇, 等. 铜藻多酚的提取工艺及其稳定性和抑制酪氨酸酶活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(9): 104–110. [HE N N, CAI S Y, YAN G Y, et al. Extraction process of polyphenols from copper algae and their stability and tyrosinase inhibitory activity[J]. Food Research and Development, 2024, 45(9): 104–110.]
- [30] 穆谈航, 叶嘉, 杨明建, 等. 石榴皮多酚提取工艺优化及其贮藏稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 142–146. [MU T H, YE J, YANG M J, et al. Optimisation of pomegranate peel polyphenol extraction process and its storage stability studies[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 142–146.]
- [31] 雷丹, 李军胜, 李书艺, 等. 莲藕可溶性膳食纤维与多酚复合物的稳定性及脂肪吸附活性研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 31–39. [LEI D, LI J S, LI S Y, et al. Studies on the stability and fat adsorption activity of soluble dietary fibre and polyphenol

- complexes from lotus roots[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 31–39. ]
- [ 32 ] LI X G, ZHANG F Y, JIANG C X, et al. Structural analysis, *in vitro* antioxidant and lipid-lowering activities of purified tremella fuciformis polysaccharide fractions[J]. *Process Biochemistry*, 2023, 133: 99–108.
- [ 33 ] 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 W Z, YANG P P, TI Y R, et al. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from longya lilies and analysis of their antioxidant and hypolipidemic activities[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(18): 251–257. ]
- [ 34 ] 曹艳妮, 徐坤, 邱思, 等. 刺梨、苹果和脐橙复配物的抗氧化能力[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 60–66. [ CAO Y N, XU K, QIU S, et al. Antioxidant capacity of prickly pear, apple and navel orange complexes[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(7): 60–66. ]
- [ 35 ] WANG J Y, LIU W, CHEN Z Q, et al. Physicochemical characterization of the oolong tea polysaccharides with high molecular weight and their synergistic effects in combination with polyphenols on hepatocellular carcinoma[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2017, 90: 160–170.
- [ 36 ] KOŠŤÁLOVÁ Z, HROMÁDKOVÁ Z. Structural characterisation of polysaccharides from roasted hazelnut skins[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 179–184.
- [ 37 ] FAN H R, YAO X, CHEN Z J, et al. Interaction of high amylose corn starch with polyphenols: Modulating the stability of polyphenols with different structure against thermal processing[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137708.
- [ 38 ] BUCHWEITZ M, CARLE R, KAMMERER D R. Bathochromic and stabilising effects of sugar beet pectin and an isolated pectin fraction on anthocyanins exhibiting pyrogallol and catechol moieties[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 3010–3019.
- [ 39 ] ZHANG X J, KONG X R, HAO Y, et al. Chemical structure and inhibition on  $\alpha$ -glucosidase of polysaccharide with alkaline-extracted from glycyrrhiza inflata residue[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 1125–1135.
- [ 40 ] 邹晓琴, 刘秋兰, 黄菲, 等. 莲藕多糖-绿原酸复合体制备及特性评价[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 184–193. [ ZOU X Q, LIU Q L, HUANG F, et al. Preparation and characterisation of lotus root polysaccharide-chlorogenic acid complexes[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(7): 184–193. ]
- [ 41 ] 张阳洋, 范金波, 麻奥, 等. 分子模拟结合荧光光谱法探究 BSA-多酚复合物形成机理及对多酚的保护作用[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 298–308. [ ZHANG Y Y, FAN J B, MA A, et al. Molecular modelling combined with fluorescence spectroscopy to investigate the formation mechanism of bsa-polyphenol complexes and their protective effects on polyphenols[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(8): 298–308. ]
- [ 42 ] 干建松. 荸荠皮多酚的纯化与抗氧化性、稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 27–33. [ GAN J S. Purification and antioxidant properties and stability of polyphenols from water chestnut skin[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(17): 27–33. ]
- [ 43 ] SALAZAR G L, VILLALBA R, BERNAL M J, et al. Effect of storage conditions on the stability of polyphenols of apple and strawberry purees produced at industrial scale by different processing techniques[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(5): 2541–2553.
- [ 44 ] 魏奇, 翁馨, 吴艳钦, 等. 食用菌多糖降脂活性及其作用机制的研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 190–194. [ WEI Q, WENG X, WU Y Q, et al. Research progress on lipid-lowering activity of edible mushroom polysaccharides and their mechanism of action[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(9): 190–194. ]
- [ 45 ] 施慧, 张玉, 陈磊, 等. 龙眼壳/核膳食纤维对油脂、胆固醇和胆酸钠的吸附作用[J]. 食品工业, 2015, 36(3): 103–107. [ SHI H, ZHANG Y, CHEN L, et al. Adsorption of lipids, cholesterol and sodium bile acids by longan shell/kernel dietary fibre[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(3): 103–107. ]
- [ 46 ] 钟希琼, 胡文娥, 林丽超. 膳食纤维对油脂、胆固醇、胆酸钠和亚硝酸根离子吸附作用的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 134–136. [ ZHONG X Q, HU W E, LIN L C. Studies on the adsorption of lipids, cholesterol, sodium cholate and nitrite ions by dietary fibre[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(5): 134–136. ]
- [ 47 ] YIN D F, ZHONG Y D, LIU H, et al. Lipid metabolism regulation by dietary polysaccharides with different structural properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024: 132253.
- [ 48 ] SUN H R, FAN R Q, FANG R, et al. Dynamics changes in metabolites and pancreatic lipase inhibitory ability of instant dark tea during liquid-state fermentation by aspergillus niger[J]. *Food Chemistry*, 2024, 448: 139136.