陈颖, 秦毅臻, 鲁燕玲, 等. 核桃内种皮多酚的体外模拟消化特性及其抗氧化、降血糖活性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 461−470. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070351

CHEN Ying, QIN Yizhen, LU Yanling, et al. *In Vitro* Simulated Digestive Properties of Walnut Pellicle Polyphenols and Their Antioxidant and Hypoglycemic Activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 461−470. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070351

· 营养与保健 ·

核桃内种皮多酚的体外模拟消化特性及其抗氧化、降血糖活性

陈　颖[1], 秦毅臻[1], 鲁燕玲[1], 袁国惠[1], 杨娇娇[1], 韩　龙[1,2,3,*], 范方宇[1,2,3,*]

（1.西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224;
2.云南省高校大健康类森林资源开发利用工程研究中心, 云南昆明 650224;
3.云南省森林灾害预警与控制实验室, 云南昆明 650224）

摘　要: 为研究核桃内种皮多酚提取物在体外模拟消化过程中的酚类物质和生物活性的变化，本文对核桃内种皮多酚提取物依次进行模拟口腔消化、胃消化和小肠消化，测定核桃内种皮多酚提取物在不同消化阶段的总酚含量，以 DPPH·、$ABTS^{+}$·清除率、α-葡萄糖苷酶抑制率、α-淀粉酶抑制率为指标，考察核桃内种皮多酚提取物抗氧化、降血糖活性的变化情况。结果表明，消化导致总酚含量显著降低（$P<0.05$），总酚含量由 695.27 mg GAE/g 降至 437.58 mg GAE/g，在小肠阶段的降解最为显著。核桃内种皮多酚共鉴定出 224 种酚类物质，主要酚类物质有没食子酸、柯里拉京、绿原酸等。在消化过程中，核桃内种皮多酚的抗氧化能力显著下降（$P<0.05$），DPPH·清除率从 90.18% 降至 35.73%，$ABTS^{+}$·清除率从 90.84% 降至 47.33%。同时，其降血糖活性也显著降低（$P<0.05$），表现为 α-葡萄糖苷酶抑制率下降 36.18%，α-淀粉酶抑制率下降 72.44%。消化结束后，核桃内种皮多酚发生降解或转变，但仍能发挥一定的生物活性。在消化过程中，DPPH·和 $ABTS^{+}$·清除率、α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶抑制率的变化与总酚含量变化呈正相关。本研究表明核桃内种皮多酚具备开发功能性食品的潜力，为核桃加工副产物的资源化利用提供了理论依据。

关键词: 核桃内种皮, 多酚, 体外消化, 抗氧化, 降血糖

中图分类号: TS209　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0461−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070351

本文网刊:

In Vitro Simulated Digestive Properties of Walnut Pellicle Polyphenols and Their Antioxidant and Hypoglycemic Activities

CHEN Ying[1], QIN Yizhen[1], LU Yanling[1], YUAN Guohui[1], YANG Jiaojiao[1], HAN Long[1,2,3,*], FAN Fangyu[1,2,3,*]

（1.College of Biological and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2.Forest Resources Exploitation and Utilization Engineering Research Center for Grand Health of Yunnan Provincial Universities, 650224, China;
3.Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control of Yunnan Province, Kunming 650224, China）

Abstract: To investigate the effects of *in vitro* digestion on the phenolic compounds and bioactivity of walnut pellicle polyphenols extracts, the walnut pellicle polyphenols extracts were subjected sequentially to simulated oral, gastric and small intestinal digestion in this study. The total phenolic content of the walnut pellicle polyphenols extracts was measured at different stages of digestion. Antioxidant and hypoglycemic activities of the walnut pellicle polyphenols extracts were

收稿日期: 2025−07−30

基金项目: 中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目（202407AA110007）; 云南省基础研究计划项目重点项目（202401AS070012）。

作者简介: 陈颖（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: chenying020728@163.com。

*** 通信作者:** 韩龙（1987−）, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品微生物生态、发酵微生物、食品加工副产物与农林废弃物资源化利用, E-mail: longhan24@vip.qq.com。

范方宇（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农林产品加工, E-mail: ffy118@163.com。

evaluated using DPPH radical scavenging rates, $ABTS^{+}$ radical scavenging rates, and α-glucosidase and α-amylase inhibition rates. The results showed that digestion led to a significant decrease ($P<0.05$) in the total phenolic content and bioaccessibility, and the total phenolic content decreased from 695.27 mg GAE/g to 437.58 mg GAE/g, with the most significant degradation in the small intestine stage. A total of 224 phenolics were identified in the walnut pellicle polyphenols, and the main polyphenols were gallic acid, corilagin, and chlorogenic acid. During digestion, the antioxidant capacity of walnut pellicle polyphenols decreased ($P<0.05$), with DPPH· radical scavenging rate dropping from 90.18% to 35.73% and $ABTS^{+}$ radical scavenging rate declining from 90.84% to 47.33%. Simultaneously, their hypoglycemic activity also weakened ($P<0.05$), manifested by a 36.1% decrease in α-glucosidase inhibition rate and a 72.44% decrease in α-amylase inhibition rate. At the end of digestion, the walnut pellicle polyphenols were degraded or transformed, but they still exerted some biological activities. During the digestion process, the changes of DPPH· and $ABTS^{+}$· scavenging rates, α-glucosidase and α-amylase inhibition rates were positively correlated with the changes of total phenol content. This study demonstrated that walnut pellicle polyphenols had the potential to develop functional foods, and also provided a theoretical basis for the resource utilization of walnut processing by-products.

Key words: walnut pellicle polyphenols; polyphenols; *in vitro* digestion; antioxidant; hypoglycemia

核桃(*Juglans regia* L.)为胡桃科核桃属多年生乔木,是全球四大木本坚果树种之一,其兼具油料作物、经济林和生态修复性植物等多重属性,在农林产业中占重要地位[1−2]。核桃除传统可食用价值,其活性成分具有抗氧化、抗病毒、抗菌及神经保护等多种功能[3]。核桃内种皮是核桃仁表面的一层薄膜状结构,其质量仅占核桃仁的 5% 左右,集中了大量的酚类次生代谢产物,是核桃中生物活性成分的主要来源[4]。然而,核桃内种皮因含大量单宁类物质,有明显的食用苦涩味,在核桃仁深加工过程中常作为副产物被废弃,造成高价值生物活性物质的严重浪费[5]。因此,研究核桃种皮多酚的组成及生物活性,对实现农林加工副产物的高值化利用具有重要意义。

多酚,又名植物单宁,是具有多个羟基的芳香族化合物,广泛存在于水果、蔬菜和草本植物的根、皮、叶、果实和种子中[6],具有抗氧化、抑菌、抗炎[7]、降血糖[8−9]、调节肠道菌群[10] 等多种活性,在学界受到广泛研究。然而,研究表明多酚的生理功能会受到人体消化的影响。He 等[11] 对 22 种果汁的生物活性物质进行体外模拟消化研究,发现消化后的多酚、多糖的含量及其抗氧化能力、α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制率显著提高,表明体外消化过程促进了活性成分的释放。Laya 等[12] 对木薯叶中的多酚进行体外模拟消化,发现消化后酚类物质含量下降,但其活性仍具较好的抗糖尿病和抗肥胖能力,表明体外消化会造成活性成分的降解或转化。因此,研究活性成分在消化过程中的变化具有重要意义。体外模拟消化实验是通过构建与动物体内相近的环境和消化酶体系从而高度还原体内消化过程,其具有成本低、周期短且重复性高等优势,是连接体外化学活性与体内生理功能的关键桥梁。

目前,关于核桃内种皮多酚的研究多关注于对其提取方法和生理功能的探索,对核桃内种皮多酚在体外模拟胃肠道的消化及活性变化的研究较少。基于此,本研究采用超声辅助乙醇法提取核桃内种皮多酚,经大孔吸附树脂纯化后探讨体外模拟消化特性,研究各消化阶段多酚含量、抗氧化能力和降血糖活性的变化,并通过 UHPLC-MS/MS 技术鉴定各消化阶段的酚类物质组成和相对含量,以期为核桃内种皮多酚在体内消化研究中提供理论参考,同时为其高值化利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

核桃 云南漾濞;氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、无水碳酸钠 分析纯,广东光华科技股份有限公司;氢氧化钠、盐酸 分析纯,云南杨林工业开发区汕滇药业有限公司;粘蛋白、胃蛋白酶(猪胃粘膜)(3000 U/g)、胰蛋白酶(猪胰)(250 U/mg)、α-淀粉酶(5 U/mg)、α-葡萄糖苷酶(25 U/mg)、对硝基苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷(p-NPG) 分析纯,上海源叶生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS) HPLC≥98%,合肥巴斯夫生物科技有限公司。

FD5-3 真空冷冻干燥机 北京华夏乐博仪器有限公司;JHF-500 多功能粉碎机 南京贝帝实验仪器有限公司;KQ 5200 DE 台式数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;5804R 高速中等通量台式离心机 德国艾本德公司;MD SpectraMax Plus 384 酶标仪 美国伯腾公司;N-1100 旋转真空蒸发仪 上海泉杰仪器有限公司;OTRAP 6500+质谱仪 美国应用生物系统公司;Nexera X2 LC-30AD 超高压液相色谱仪 日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 核桃内种皮多酚的提取与纯化 参考许飞利等[13] 方法,稍作修改。将干燥后的核桃内种皮粉碎,过 60 目筛,石油醚脱脂 3 次。以 70%(v/v)乙醇作为提取剂,50 ℃ 超声(200 W, 40 Hz)核桃内种皮 55 min,料液比 1∶60(m∶v)。4 ℃ 8000 r/min 离心浸提液,沉淀按照相同程序进行 3 次浸提,混合上清液,50 ℃ 旋转蒸发直至除去乙醇。获得的核桃内种皮多酚提取物,冷冻干燥后储存在干燥器中,备用。参

考 Xie 等[14]方法，稍作修改，进行样品的纯化。采用 AB-8 大孔吸附树脂对核桃内种皮粗多酚进行纯化，纯化后核桃内种皮多酚的纯度为 69.53%，比纯化前(53.85%)提高了 15.68%。

1.2.2　体外模拟消化　体外模拟消化模型包括口腔、胃和小肠消化。采用陈雅琪[15]的方法，稍作修改。口腔消化阶段：准确称取 0.20 g 样品，加入 10.0 mL 蒸馏水，与 10.0 mL 含有 30.0 mg/mL 粘蛋白的模拟唾液混合，混合物 pH 调至 6.8，37 ℃ 恒温摇床(100 r/min)振荡 10 min。胃消化阶段：经口腔消化的样品与 20.0 mL 的模拟胃液 1∶1(v∶v)混合，调节 pH 至 2.5，37 ℃ 恒温摇床(100 r/min)振荡 2 h。小肠消化阶段：胃消化的样品 pH 调至 7.0，依次添加 2.0 mL 模拟肠液、4.67 mL 胆盐溶液、和 3.33 mL 胰酶溶液，37 ℃ 恒温摇床(100 r/min)振荡 2 h，期间维持体系 pH 在 7.0。将各阶段的模拟消化液在 4 ℃、8000 r/min 离心 30 min，得到模拟口腔消化样品、胃消化样品，小肠消化样品，考察其总酚含量、抗氧化能力、α-葡萄糖苷酶抑制率和 α-淀粉酶抑制率。

1.2.3　总酚含量的测定　参考 Xie 等[14]方法，稍作修改。取 0.5 mL 样品，加入 0.2 mol/L Folin 试剂 2.5 mL，7.5%(w/v)碳酸钠溶液 2.0 mL，避光静置 1 h，于 765 nm 处测量吸光度，以上操作重复 3 次。总没食子酸含量以没食子酸当量 mg(GAE)/g 核桃内种皮干重表示，没食子酸标准曲线 y=7.6917x+0.0116，R^2=0.9991。总酚含量按式(1)计算：

$$\text{总酚含量(mg GAE/g)} = \frac{C \times V \times N}{m} \qquad \text{式（1）}$$

式中：C 为由没食子酸标准曲线计算得出的样品中等效没食子酸浓度，mg/mL；V 为溶液的体积，mL；N 为稀释的倍数；m 为样品的质量，g。

1.2.4　多酚组成成分分析　取 1.0 mL 各消化阶段样品冷冻干燥，加入 80%(v/v)甲醇溶液 1.0 mL，超声 20 min 后静置 1 h，离心(4 ℃，8000 r/min)，取上清液冷冻干燥。以 200 μL 50%(v/v)甲醇溶液复溶样品，离心，取上清液于 UHPLC-MS/MS 检测。超高效液相色谱条件：HSS T3 色谱柱进行分离，进样量 10 μL，柱温 40 ℃，流速 200 μL/min。流动相体系：A 相为 0.1%(w/v)甲酸水溶液，B 相为 100%(v/v)乙腈。正离子模式液相梯度洗脱程序如下：0~2.5 min，0% B；2.5~9 min，0%~30% B；9~10 min，30%~100% B；10~15.4 min，100% B；15.4~15.5 min，100%~0% B；15.5~18 min，0% B。负离子模式液相梯度洗脱程序如下：0~2 min，0% B；2~2.5 min，0%~20% B；2~3.5 min，20%~40% B；3.5~4.5 min，40%~50% B；4.5~10 min，50%~100% B；10~15.4 min，100% B；15.4~15.5 min，100%~0% B；15.5~18 min，0% B，以上均为体积分数。样品经超高效液相色谱分离后用质谱仪进行质谱分析，使用加热电喷雾离子源进行离子化，质谱条件：电喷雾离子源温度为 550 ℃；离子喷雾电压为 5500 V(正离子模式)/−4500 V(负离子模式)；离子源气体 I、气体 II 和帘气分别设置为 40、50 和 35 psi。采用多反应监测(Multiple reaction monitoring，MRM)模式检测待测离子对。

1.2.5　抗氧化能力的测定

1.2.5.1　DPPH·清除率测定　参考 Ren 等[16]的方法，稍作修改。配制 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液，避光储存。2.0 mL 样品和等体积 DPPH 溶液混匀作为样品组(A_1)，室温避光反应 30 min，517 nm 处测定吸光值，以上操作重复 3 次。以 2.0 mL 样品和等体积无水乙醇混匀作为对照组(A_2)，以 2.0 mL DPPH 溶液和等体积无水乙醇混匀作为空白组(A_0)。DPPH·清除率按式(2)计算：

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \qquad \text{式（2）}$$

式中：A_1 为样品吸光度；A_2 为对照组吸光度；A_0 为空白组吸光度。

1.2.5.2　$ABTS^+$·清除率测定　参考 Ren 等[16]的方法，稍作修改。将 ABTS 溶液(7.0 mmo1/L)和过硫酸钾溶液(140.0 mmo1/L)1∶1(v∶v)混合，室温避光反应 16 h，无水乙醇稀释至 734 nm 处吸光度为 0.70±0.02 的 ABTS 工作液。2.0 mL 样品和等体积 ABTS 溶液混匀作为样品组(A_1)，以 2.0 mL 样品和等体积无水乙醇混匀作为对照组(A_2)，以 2.0 mL ABTS 溶液和等体积无水乙醇混匀作为空白组(A_0)。室温避光反应 6 min，734 nm 处测定吸光值，以上操作重复 3 次。$ABTS^+$·清除率按式(3)计算：

$$\text{ABTS}^+\cdot\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \qquad \text{式（3）}$$

式中：A_1 为样品吸光度；A_2 为对照组吸光度；A_0 为空白组吸光度。

1.2.6　降血糖活性的测定

1.2.6.1　α-葡萄糖苷酶抑制率测定　α-葡萄糖苷酶抑制率的测定参考文献 [17−18] 的方法，稍作修改。将样品稀释至同一倍数，取 50 μL 转移到 96 孔板中，加入 100 μL 1 U/mL α-葡萄糖苷酶溶液。37 ℃ 避光反应 10 min，加入 50 μL 0.005 mol/L p-NPG 溶液，37 ℃ 反应 20 min。加入 50 μL 0.1 mol/L 碳酸钠溶液终止反应，405 nm 处测定其吸光值，以上操作重复 3 次。α-葡萄糖苷酶抑制率按式(4)计算：

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3 - A_4}\right) \times 100 \qquad \text{式（4）}$$

式中：A_1 为含 α-葡萄糖苷酶的提取物的吸光度；A_2 为不含 α-葡萄糖苷酶(以 pH6.8 的磷酸盐缓冲液(Phosphate buffer saline，PBS)代替)的提取物的吸光度；A_3 为含 α-葡萄糖苷酶的 pH6.8 的 PBS 的吸光度；A_4 为不含 α-葡萄糖苷酶的 pH6.8 的 PBS 的吸光度。

1.2.6.2 α-淀粉酶抑制能力测定 参照 Akhtar 等[19]的方法，稍作修改。将样品稀释至同一倍数，取 500 μL 样品于 2 mL 离心管，加入 500 μL α-淀粉酶于 37 ℃ 水浴 10 min，加入 1.0%（w/v）的可溶性淀粉溶液 500 μL 继续水浴 10 min，取出加入 1.0 mL DNS 显色剂，沸水浴 5 min 终止反应。蒸馏水定容至 10.0 mL，冷却至室温，540 nm 测吸光值，以上操作重复 3 次。α-淀粉酶抑制率按式(5)计算：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制能力}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad 式（5）$$

式中：A_1 为含 α-淀粉酶的提取物的吸光度；A_2 为不含 α-葡萄糖苷酶（以 pH6.9 的 PBS 代替）的提取物的吸光度；A_0 为含 α-淀粉酶的 pH6.9 的 PBS 的吸光度。

1.3 数据处理

所有实验至少重复三次，结果以均数±标准差（$\overline{X}$±SD）表示。采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行统计学意义分析（显著性水平 $P<0.05$ 表示有统计学意义），采用 Origin 2021 软件和 ChiPlot 免费在线平台（https://www.chiplot.online）绘图，相关性分析采用皮尔逊相关（Pearson correlation）系数法。

2 结果与分析

2.1 体外模拟消化中核桃内种皮总酚含量变化

食品中酚类物质的释放受到人体消化过程的影响，其释放行为因样品类型而异[20]。多酚体外模拟消化实验，可高效、低成本地获取其在消化过程中的关键数据为后续研究和应用提供科学依据[21]。图 1 为体外模拟消化中核桃内种皮多酚的总酚含量变化，体外模拟消化中核桃内种皮总酚含量呈现下降趋势。未经消化的核桃内种皮总酚含量最高，达到 695.27 mg GAE/g，是因为其含有大量的游离多酚[22]；

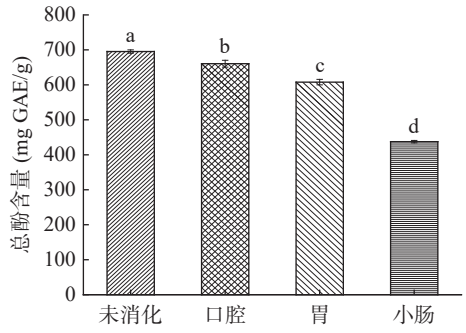


图 1 体外模拟消化中核桃内种皮多酚的总酚含量变化

Fig.1 Changes of total phenol content in walnut pellicle polyphenols through *in vitro* simulated digestion

注：不同小写字母表示不同消化阶段的核桃内种皮多酚之间存在显著差异（$P<0.05$）。

经口腔和胃消化后核桃内种皮总酚含量分别减少了 34.81 mg GAE/g 和 87.46 mg GAE/g；小肠消化后，核桃内种皮总酚含量显著下降（$P<0.05$），为 437.58 mg GAE/g。总酚含量在口腔消化后出现下降，是因为口腔消化作为消化过程的第一阶段唾液浸渍会对后续消化过程的多样性产生影响[23]。总酚含量在小肠消化后损失量是胃消化的 2.95 倍，说明与小肠环境相比，核桃内种皮多酚在胃的酸性环境中更加稳定。因为多酚在中性或微碱性 pH 与胰酶、胆汁盐存在的小肠液环境下易发生氧化降解或转化为新的化合物，导致核桃内种皮总酚含量降低；某些酚类物质（如槲皮素、没食子酸等）在酸性环境中相对稳定，因此胃消化阶段核桃内种皮总酚含量的下降较少[24]。Li 等[25]在山药酚类化合物的体外模拟消化的研究中也有类似发现。综上，消化过程会使核桃内种皮总酚含量下降，但其不会完全降解。

2.2 体外模拟消化中核桃内种皮多酚的酚类化合物组成

基于 UHPLC-MS/MS 技术鉴定不同消化阶段

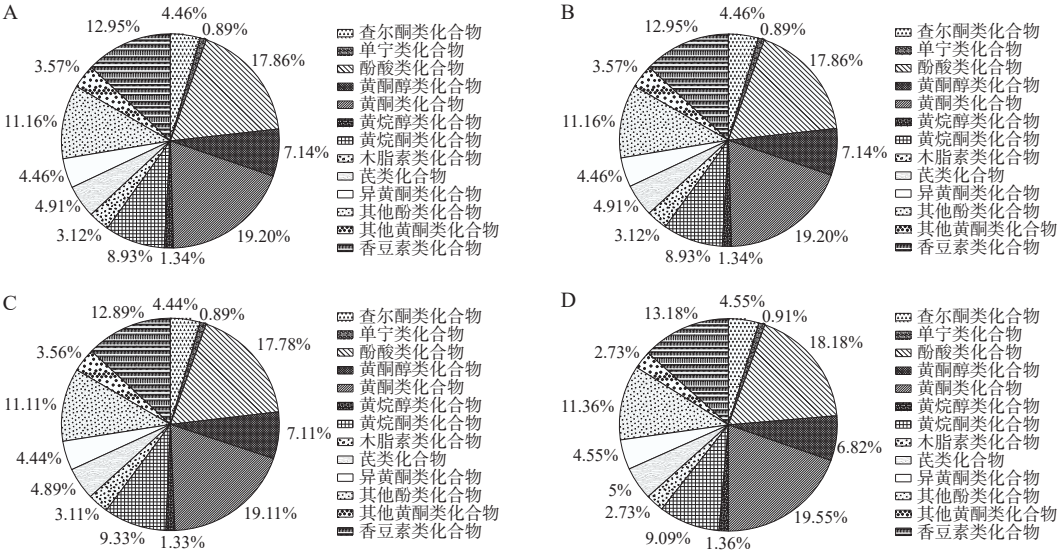


图 2 体外模拟消化过程中核桃内种皮多酚的酚类化合物分类

Fig.2 Classification of phenolic compounds of walnut pellicle polyphenols through *in vitro* simulated digestion

注：A.未消化；B.口腔阶段；C.胃阶段；D.小肠阶段。

核桃内种皮多酚的酚类化合物组成(图 2)。核桃内种皮多酚由 224 种酚类化合物组成，其在口腔消化、胃消化和小肠消化阶段分别被检出 224、225 和 220 种酚类化合物。核桃内种皮多酚包括 43 种黄酮、40 种酚酸、29 种香豆素、20 种黄烷酮、16 种黄酮醇、11 种芪类、10 种查尔酮、10 种异黄酮、7 种木脂素、2 种单宁、3 种黄烷醇、25 种其他酚类和 8 种其他黄酮类化合物；口腔消化阶段酚类化合物的组成与未消化阶段的一致，可能是因为口腔阶段的消化时间较短，酚类化合物没有足够的时间发生转化，但酚类化合物的相对含量仍有差异；与未消化阶段和口腔阶段相比，胃消化阶段增加了 1 种黄烷酮类化合物(芸香柚皮苷)，黄烷酮类化合物的占比增加了 0.40%，这可能是因为某些黄烷酮类化合物在胃的酸性环境中发生糖基化形成了黄烷酮苷[26]，使黄烷酮类化合物的数量增加；在小肠消化阶段，黄酮醇类化合物的占比为 6.82%，比胃消化阶段减少 0.29%，木脂素类化合物、黄烷酮类化合物和其他黄酮类化合物也出现降解，是因为小肠的弱碱性环境不利于酚类化合物的稳定，酚类化合物经过小肠消化后发生较大程度的降解[26]。

2.3　体外模拟消化中核桃内种皮多酚的主要酚类化合物变化

基于上述对核桃内种皮多酚在体外模拟消化过程中酚类化合物的整体组成变化，选取各消化阶段样品中相对丰度较高的物质作为主要酚类化合物进行比较，分析其在体外模拟消化过程中的变化。并将主要酚类化合物按化学结构特征分为酚酸类化合物、单宁类化合物、类黄酮类化合物、芪类化合物和其他酚类化合物(表 1)。

在酚酸类化合物中，没食子酸是核桃内种皮多酚的重要组成成分。其在未消化样品中具有较高丰度，为 $850.52\times10^5\pm1.23\times10^5$，经体外消化后，其相对丰度在口腔阶段和小肠阶段显著增加($P<0.05$)，并于小肠阶段达到峰值($4400.64\times10^5\pm8.18\times10^5$)，这表明没食子酸在消化过程中可能被大量释放或由前体物质转化，且小肠是其释放的关键阶段。没食子酸是可水解单宁的降解产物，其在小肠阶段的相对丰度显著增加($P<0.05$)，可能与水解单宁在消化过程中的降解有关[27−28]。此外，没食子酸的相对丰度在胃消化阶段显著下降($P<0.05$)，原因可能是没食子酸可通过氢键、范德华力等非共价作用与胃蛋白酶结合形成复合物，导致其相对丰度下降[29]。6-O-咖啡酰-D-葡萄糖在消化过程中相对丰度整体呈下降趋势，相较于未消化阶段，其小肠消化阶段的相对丰度下降了 97.26%。现已有研究关于胰酶对羧基连接的羟基肉桂酰葡萄糖酯具有特异性酯酶活性，6-O-阿魏酰-D-葡萄糖作为与其结构相似的底物被水解为游离阿魏酸和葡萄糖，因此，6-O-咖啡酰-D-葡萄糖也有可能被水解为咖啡酸和 D-葡萄糖，导致其相对丰度显著下降($P<0.05$)[30−31]。绿原酸在消化各阶段的相对丰度较低，且在口腔和小肠阶段均低于未消化样品，原因为绿原酸在口腔和小肠的碱性条件下水解生成 3-O-咖啡酰奎宁酸和 4-O-咖啡酰奎宁酸[32]。间羟基肉桂酸的相对丰度在消化过程中呈现先下降后上升的趋势。酚酸类化合物在消化过程中的变化可能体现酚类化合物的结合态向游离态转化的特征。

在单宁类化合物中，柯里拉京在未消化和消化各阶段具有较高的相对丰度(未消化：$2552.05\times10^5\pm1.99\times10^5$、口腔：$2301.10\times10^5\pm17.92\times10^5$、胃：$1989.30\times10^5\pm96.06\times10^5$、小肠：$2465.06\times10^5\pm62.90\times10^5$)，说明其可能是核桃内种皮多酚中的重要成分。

表 1　体外模拟消化中核桃内种皮多酚的主要酚类化合物

Table 1　Major phenolic compounds of walnut pellicle polyphenols through *in vitro* simulated digestion

化合物类别	化合物名称	相对丰度($\times10^5$)			
		未消化	口腔	胃	小肠
酚酸类化合物	没食子酸	850.52±1.23^{d}	3370.79±39.20^{b}	1519.78±17.23^{c}	4400.64±8.18^{a}
	6-O-咖啡酰-D-葡萄糖	651.86±1.94^{a}	118.12±2.18^{b}	21.34±0.33^{c}	17.89±0.11^{d}
	绿原酸	13.97±0.05^{a}	3.73±2.77^{c}	8.66±0.05^{b}	6.30±0.01^{c}
	间羟基肉桂酸	45.11±0.18^{b}	39.08±0.09^{c}	38.06±.016^{d}	93.71±0.18^{a}
单宁类化合物	柯里拉京	2552.05±1.99^{a}	2301.10±17.92^{c}	1989.30±96.06^{d}	2465.06±62.90^{b}
	1-O-没食子酰基-D-葡萄糖	596.92±5.29^{a}	236.57±4.63^{c}	280.79±7.66^{b}	143.16±4.61^{d}
类黄酮类化合物	金合欢素	157.38±1.73^{a}	92.85±0.77^{b}	63.50±0.57^{c}	20.20±0.01^{d}
	香蜂草苷	192.38±11.41^{a}	153.58±1.95^{b}	18.43±0.70^{d}	45.40±0.45^{c}
	6-羟基黄酮	19.92±0.06^{c}	130.40±1.34^{b}	13.00±0.02^{d}	140.32±0.66^{a}
	圣草酚	65.31±1.48^{b}	104.74±9.89^{a}	13.52±0.46^{d}	47.82±0.58^{c}
	槐黄烷酮 G	118.35±2.62^{a}	82.17±0.23^{c}	89.71±0.004^{b}	73.18±0.36^{d}
	甲基紫檀素	54.42±0.07^{b}	54.16±0.25^{b}	44.44±0.06^{c}	70.61±0.35^{a}
芪类化合物	白皮杉醇	121.87±0.93^{a}	0.17±0.01^{c}	0.90±0.003^{b}	0.12±0.004^{d}
其他酚类化合物	2',4'-二羟基苯乙酮	331.96±3.54^{a}	268.19±5.57^{b}	246.66±19.86^{b}	123.37±0.80^{c}
	2,6-二羟基苯乙酮	255.64±2.47^{a}	241.21±1.92^{b}	79.94±0.04^{c}	61.16±0.05^{d}

注：同行不同小写字母表示化合物在各消化阶段具有显著性差异($P<0.05$)，表2同。

相较于未消化阶段，小肠消化结束后的柯里拉京和 1-O-没食子酰基-D-葡萄糖的相对丰度分别下降了 3.41%、76.02%，可能是因为柯里拉京和 1-O-没食子酰基-D-葡萄糖作为水解单宁可被酸、碱和特定的酶催化水解，释放出鞣花酸或没食子酸等小分子酚酸[27−28]，因此，单宁类化合物在消化后相对丰度降低，而其代谢物（没食子酸）相对丰度反而升高。

在类黄酮类化合物中，金合欢素、香蜂草苷、6-羟基黄酮、圣草酚、槲黄烷酮 G 和甲基紫檀素的相对丰度变化存在差异。其中，与未消化阶段相比，金合欢素、香蜂草苷和槐黄烷酮 G 的相对丰度在小肠消化阶段分别下降了 87.16%、76.40% 和 38.17%。先前有研究表明环境的 pH 变化会影响消化过程中释放的类黄酮物质，当其暴露于中性或碱性环境时更容易分解或转化为分子量更小的酚酸[33−34]。6-羟基黄酮和圣草酚的相对丰度在口腔阶段升高，胃阶段下降，在小肠阶段再次升高，而甲基紫檀素的相对丰度在小肠阶段升高。

白皮杉醇为芪类化合物，在核桃内种皮多酚中相对丰度较高，但其相对丰度在口腔、胃和小肠消化阶段显著降低（$P<0.05$），可能是因为芪类化合物（如白藜芦醇）的化学结构不稳定，易受到消化道环境的影响而发生降解[35]。

其他酚类化合物包括 2',4'-二羟基苯乙酮和 2,6-二羟基苯乙酮，其相对丰度在小肠阶段相较于未消化时分别下降了 62.84% 和 76.08%，表明其在消化后出现降解。

综上所述，核桃内种皮多酚的主要酚类化合物在体外模拟消化过程中的变化具有差异性，且体外模拟消化影响了核桃内种皮多酚中各类化合物的相对丰度与结构稳定性，其中小肠消化阶段是主要酚类化合物结构转化和释放的关键阶段。

2.4 核桃内种皮多酚在体外模拟消化过程中的抗氧化能力

通过不同的测定方法（DPPH、ABTS 实验）评估核桃内种皮多酚在体外模拟消化过程中的抗氧化能力（图 3），核桃内种皮多酚对自由基清除能力越大说明其抗氧化能力越强[36]。两种方法均表明，未经消化的核桃内种皮多酚的抗氧化能力最强（$P<0.05$），达到 90% 以上。随着消化过程的进行，DPPH·和 $ABTS^{+}$· 清除率呈下降趋势，分别从 90.18% 和 90.84% 下降到 35.73% 和 47.33%，与总酚含量变化的趋势一致。此外，核桃内种皮多酚在消化过程中对 $ABTS^{+}$· 清除效果均优于 DPPH·，是因为不同自由基的氧化作用机制存在差异[36]。消化结束后，核桃内种皮多酚发生降解或者转变，但仍具有较强的抗氧化能力。

2.5 核桃内种皮多酚在体外模拟消化过程中的降血糖活性

在糖尿病治疗方案中，α-葡萄糖苷酶与 α-淀粉酶因其在碳水化合物代谢中的核心作用被确立为关键药理学靶点，抑制 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶可有效控制餐后血浆葡萄糖水平，对于预防和管理糖尿病至关重要，因此，控制餐后高血糖的有效策略之一是使用 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶抑制剂延迟葡萄糖吸收[37]。核桃内种皮多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制率如图 4A 所示。核桃内种皮多酚在消化后对 α-葡萄糖苷酶的抑制率总体呈下降趋势，未消化的核桃内种皮多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制率最高（$P<0.05$），达到 98.05%；口腔消化后，其对 α-葡萄糖苷酶的抑制率下降 5.77%，胃消化阶段又上升至 97.32%。未消化和经口腔、胃消化的核桃内种皮多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制率无显著性差异（$P>0.05$），可能是由于核桃内种皮多酚中对酶活性具有抑制作用的酚类成分在口腔和胃消化阶段未被大量破坏或降解，仍能通过协同作用维持其抑制活性。小肠消化后，核桃内种皮多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制率显著下降（$P<0.05$），为 61.87%，可能是在肠消化的弱碱性环境下，黄酮类化合物的稳定性下降导致酚类物质含量的下降，因此其抑制 α-葡萄糖苷酶的能力减弱[20]。相较于未消化阶段，小肠消化结束后核桃内种皮多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制率下降了 36.18%。核桃内种皮多酚对 α-淀粉酶的抑制率（如图 4B）所示，消化后其对 α-淀粉酶的抑制率呈下降趋势，与总酚含量和抗氧化能力的变化趋势一致。未消化的核桃内种皮多酚对 α-淀粉酶的抑制率达 91.51%；口腔消化后，α-淀粉酶抑制率显著下降（$P<0.05$），为 29.74%，可能核桃内种皮多酚在口腔消化阶段通过氢键和疏水作用与蛋白结合，形

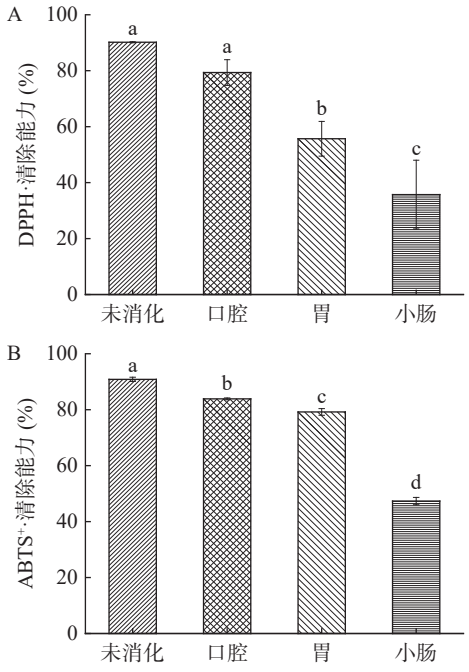


图 3 核桃内种皮多酚在体外模拟消化中抗氧化能力的变化

Fig.3 Changes in antioxidant ability of walnut pellicle polyphenols through *in vitro* simulated digestion

注：A. DPPH·清除率；B. $ABTS^{+}$·清除率；不同小写字母表示不同消化阶段的核桃内种皮多酚之间存在显著差异（$P<0.05$）；图 4 同。

成不溶性复合物并发生沉淀，进而酶抑制作用减少[38]；小肠消化后 α-淀粉酶的抑制率为 19.07%。相较于未消化阶段，小肠消化结束后核桃内种皮多酚对 α-淀粉酶的抑制率下降了 72.44%。

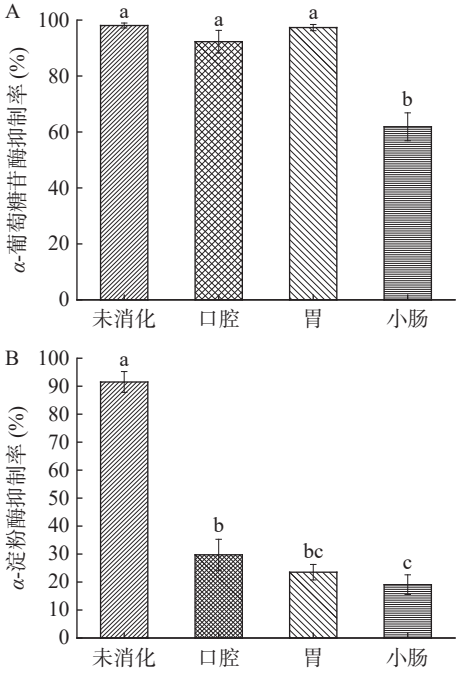


图 4　核桃内种皮多酚在体外模拟消化中降血糖活性的变化

Fig.4　Changes in hypoglycemic activity of walnut pellicle polyphenols through *in vitro* simulated digestion

注：A. α-葡萄糖苷酶抑制率；B. α-淀粉酶抑制率。

综上，核桃内种皮多酚体外模拟消化过程中，其对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制率整体呈下降趋势。未消化样品对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶均表现出较强抑制活性；其中，口腔和胃消化后 α-葡萄糖苷酶抑制率仍维持在较高水平，而 α-淀粉酶抑制率在消化后显著降低（$P<0.05$）。经消化后，核桃内种皮多酚的降血糖活性下降，但仍保留一定活性。

2.6　核桃内种皮多酚体外模拟消化过程中降血糖物质分析

通过分析消化过程中具有潜在降血糖活性的酚类化合物的相对含量变化趋势，可探究核桃内种皮多酚的降血糖活性（表 2）。高车前素[34]、异绿原酸 C(4,5)[39]、槲皮素 3-O-葡萄糖酸苷[40]、草质素[41]、香叶木素[42] 等酚类化合物的相对含量变化趋势与 α-葡萄糖苷酶抑制率一致，表明其参与了 α-葡萄糖苷酶的调节，对核桃内种皮多酚的降血糖活性有重要贡献。酚类化合物中官能团的数量和位置是其抑制 α-葡萄糖苷酶活性的关键因素，例如高车前素结构中的羟基能与底物竞争酶的催化位点，同时其疏水骨架能够诱导酶发生构象变化抑制 α-葡萄糖苷酶的活性，且抑制类型为混合型抑制[43]；异绿原酸 C(4,5)具有抑制 α-葡萄糖苷酶和蛋白酪氨酸磷酸酶 1B（PTP1B）的作用，其结构中的两个咖啡酰基团可能是导致其抑制 α-葡萄糖苷酶和 PTP1B 活性增强的原因[44]；香叶木素结构上的羟基、甲氧基可能通过氢键与 α-葡萄糖苷酶的活性位点结合，导致 α-葡萄糖苷酶活性降低。因此这些酚类物质可能通过不同的潜在降血糖机制共同发挥抑制作用[42]。金合欢素、金圣草黄素、杨梅素等酚类化合物的相对含量变化呈下降趋势，与 α-淀粉酶抑制率变化一致，表明其可能是核桃内种皮多酚中抑制 α-淀粉酶的关键成分[45−47]。具有潜在降血糖活性的不同酚类物质可能通过结合 α-淀粉酶的不同靶点抑制酶的活性，且可能随着这些物质的相对含量变化对 α-淀粉酶的抑制能力也发生变化。例如，金圣草黄素通过调节碳水化合物代谢酶来恢复肝脏损伤和控制 β 细胞的降解，对链脲佐菌素（STZ）诱导的Ⅱ型糖尿病有显著作用[46]；杨梅素能够通过两个氢键与 α-淀粉酶的活性位点结合或与其他活性位点形成范德华力，从而抑制其酶活性[48]。综上，核桃内种皮多酚中的不同酚类化合物可能在消化过程中共同发挥活性，增强核桃内种皮多酚对两种酶的抑制效果。此前的研究也有类似报道，Zeng 等[49] 发现酚类物质在低浓度下发生相互作用对抑制 α-葡萄糖苷酶表现出协同作用，Wang 等[50] 在探究结构相似的黄酮类物质抑制 α-淀粉酶的机理研究及协同作用中提到芹菜素与黄芩素、高车前素、荆芥素联合使用，协同改善了它们对 α-淀粉酶的抑制作用，这些物质间的相互作用进一步降低了酶的活性。

表 2　核桃内种皮多酚在体外模拟消化中主要发挥降血糖作用的酚类物质

Table 2　Main hypoglycemic phenolics from walnut pellicle polyphenols during *in vitro* simulated digestion

化合物名称	相对丰度（×10⁴）			
	未消化	口腔	胃	小肠
高车前素	269.15±1.49^{a}	104.72±4.64^{c}	148.67±0.29^{b}	16.49±0.03^{d}
异绿原酸C(4,5)	31.72±0.24^{a}	12.76±0.29^{c}	19.61±0.36^{b}	0.73±0.004^{d}
槲皮素3-O-葡萄糖酸苷	28.68±0.29^{a}	17.03±0.12^{c}	23.80±0.23^{b}	8.49±0.02^{d}
草质素	23.03±0.21^{a}	11.99±0.26^{c}	20.50±0.59^{b}	10.56±0.50^{d}
香叶木素	13.34±0.29^{a}	6.17±0.03^{c}	11.56±0.60^{b}	3.38±0.02^{d}
金合欢素	1573.76±17.27^{a}	928.50±7.71^{b}	634.98±5.73^{c}	202.03±0.08^{d}
金圣草(黄)素	441.39±2.06^{a}	242.75±0.60^{b}	120.12±0.56^{c}	88.61±0.35^{d}
杨梅素	301.09±0.93^{a}	239.07±1.16^{b}	139.94±0.10^{c}	67.15±0.04^{d}

2.7　抗氧化能力、降血糖活性的变化与总酚含量相关性聚类热图分析

相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析，衡量两个变量因素的相关密切程度，相关系数的绝对值越大，表明因子之间的相关性越大[21]。图 5 为核桃内种皮多酚消化前后总酚含量与抗氧化能力、降血糖活性的相关性分析结果。在体外模拟消化中核桃内种皮多酚的总酚含量与 DPPH·清除率和 $ABTS^{+}$·清除率均呈显著正相关（$P<0.05$，$P<0.01$），这与石志娇等[21] 的研究结果类似，即多酚类物质可通过酚羟基作为氢供体直接与自由

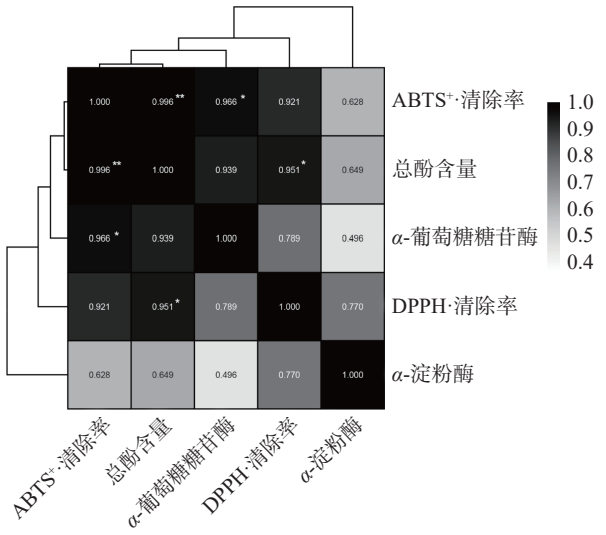


图 5 核桃内种皮多酚消化过程中体外活性与总酚含量之间的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between *in vitro* activity and active ingredient release during walnut pellicle polyphenols digestion

注: *表示相关性显著, $P<0.05$, **表示相关性极显著, $P<0.01$。

基反应、抑制产生自由基所需的酶活性、螯合诱导自由基产生的金属离子表现抗氧化活性[51]。此外, 总酚含量与 ABTS^{+}·清除率的相关性更高, 存在极强的相关性(R^2=0.996, P<0.01), 原因为 ABTS^{+}·两亲的结构可通过氢转移和转移电子实现自由基清除, 而 DPPH·清除主要是通过抗氧化剂将氢转移给自由基[52]。各消化阶段核桃内种皮多酚的总酚含量与 α-葡萄糖苷酶抑制率呈正相关(R^2=0.939), 表明多酚类物质可能是核桃内种皮发挥 α-葡萄糖苷酶抑制活性的关键物质。而核桃内种皮多酚的总酚含量与 α-淀粉酶抑制率的相关性较弱(R^2=0.649), 表明除酚类物质外还可能涉及其他物质发挥抑制作用。此外, α-葡萄糖苷酶抑制率与 α-淀粉酶抑制率的皮尔逊相关系数仅为 0.496, 说明抑制这两种酶的多酚单体物质可能存在差异, 这与前文中降血糖物质的分析结果一致。ABTS^{+}·清除率与 α-葡萄糖苷酶抑制率呈显著正相关(R^2=0.966, P<0.05), 表明核桃内种皮多酚可能同时发挥抗氧化和降血糖活性并通过抗氧化应激和抑制糖消化酶共同发挥降血糖作用。以上结果表明总酚含量对核桃内种皮多酚的抗氧化能力和抑制 α-葡萄糖苷酶有重要贡献, 且其抗氧化与降血糖活性间存在一定的相关性, 这为深入挖掘核桃内种皮多酚作为功能性食品原料的潜力提供了理论依据。

3 结论

本研究以核桃内种皮为研究对象, 通过超声辅助乙醇法提取其多酚, 探究核桃内种皮多酚在体外模拟消化中总酚含量、酚类物质组成、抗氧化能力和降血糖活性的变化。研究发现, 核桃内种皮多酚经消化后总酚含量显著降低(由 695.27 mg GAE/g 降至 437.58 mg GAE/g), 与口腔和胃消化阶段相比, 其在小肠阶段降解较多; 通过 UHPLC-MS/MS 技术共鉴定出 224 种酚类物质, 主要为没食子酸、柯里拉京、绿原酸等; 消化后核桃内种皮多酚的抗氧化能力和降血糖活性均下降, 但其仍保留了一定的生物活性; 消化过程中核桃内种皮多酚的总酚含量与抗氧化能力和降血糖活性的变化呈正相关, 与 α-淀粉酶抑制率相比, 总酚含量与抗氧化能力和 α-葡萄糖苷酶抑制率的线性相关性更强。因此, 体外模拟消化过程影响核桃内种皮多酚的总酚含量及抗氧化能力和抑制糖消化酶活性, 后续还需对核桃内种皮中的单体酚类物质进行实验, 探究不同酚类物质之间的协同效应, 明晰核桃内种皮多酚的抗氧化能力和降血糖活性, 并利用动物模型探究核桃内种皮多酚在体内的转化机制及活性作用机理, 为核桃内种皮的进一步开发利用提供实验依据。

© 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] 王浩东, 张婧怡, 石焱, 等. 大理州 2 株核桃优势真菌病原的分离鉴定及生物学特性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(6): 1−11. [WANG H D, ZHANG J Y, SHI Y, et al. Isolation and characterization of two dominant fungal pathogens of walnut in Dali Prefecture and their biological properties[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(6): 1−11.]

[2] FORDOS S, ABID N, GULZAR M, et al. Recent development in the application of walnut processing by-products (walnut shell and walnut husk)[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023, 13(16): 14389−14411.

[3] NI Z J, ZHANG Y G, CHEN S X, et al. Exploration of walnut components and their association with health effects[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(19): 5113−5129.

[4] ZHANG Y G, KAN H, CHEN S X, et al. Comparison of phenolic compounds extracted from *Diaphragma juglandis* fructus, walnut pellicle, and flowers of Juglans regia using methanol, ultrasonic wave, and enzyme assisted-extraction[J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126672.

[5] 崔硕, 李海芹, 张伟, 等. 核桃内种皮活性成分研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 62−70. [CUI S, LI H Q, ZHANG W, et al. Research progress on active ingredients in walnut pellicle[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2): 62−70.]

[6] JI W, CHEN F, CHEN Z, et al. Research in advances in the bioactivity of plant polyphenols[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(11): 8037−8044.

[7] MEI H, LI Y, WU S, et al. Natural plant polyphenols contribute to the ecological and healthy swine production[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2024, 15(1): 146.

[8] GUERRERO-BECERRA L, MORIMOTO S, ARRELLANO-ORDOñEZ E, et al. Polyphenolic compounds in fabaceous plants with antidiabetic potential[J]. Pharmaceuticals, 2025, 18(1): 69.

[9] SHAH M A, HARIS M, FAHEEM H I, et al. Cross-talk between obesity and diabetes: Introducing polyphenols as an effective phytomedicine to combat the dual sword diabesity[J]. Current Pharmaceutical Design, 2022, 28(19): 1523−1542.

[10] GUERRA-VALLE M, ORELLANA-PALMA P, PETZOLD

G. Plant-based polyphenols: Anti-Helicobacter pylori effect and improvement of gut microbiota[J]. Antioxidants, 2022, 11(1): 109.
[11] HE M, ZENG J, ZHAI L, et al. Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on polyphenol and polysaccharide content and their biological activities among 22 fruit juices[J]. Food Research International, 2017, 102: 156−162.
[12] LAYA A, KOUBALA B B, NEGI P S. Antidiabetic (*α*-amylase and *α*-glucosidase) and anti-obesity (lipase) inhibitory activities of edible cassava (*Manihot esculenta* Crantz) as measured by *in vitro* gastrointestinal digestion: Effects of phenolics and harvested time[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 492−508.
[13] 许飞利, 任嘉瑜, 王丹凤, 等. 红仁核桃内种皮多酚提取工艺研究[J]. 陕西农业科学, 2024, 70(8): 30−36. [XU F L, REN J Y, WANG D F, et al. Technology for extraction of polyphenols from inner seed coatof red kernel walnut[J]. Shanxi Journal of Agricultural Sciences, 2024, 70(8): 30−36.]
[14] XIE J, ZHANG L, BAI Y Y, et al. Isolation and purification of polyphenols, hypoglycemic and hypolipidemic and active constituent analysis of walnut septum polyphenols[J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142287.
[15] 陈雅琪. 南瓜籽油 Pickering 乳液的制备及其稳定性与消化特性的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022. [CHEN Y Q. Preparation of pumpkin seed oil Pickering emulsion and its stability and digestion characteristics[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.]
[16] REN G, SHI J, HUANG S, et al. The fabrication of novel zein and resveratrol covalent conjugates: Enhanced thermal stability, emulsifying and antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131612.
[17] HAO Q, WANG Z, WANG X, et al. The bioaccessibility, bioavailability, bioactivity, and prebiotic effects of phenolic compounds from raw and solid-fermented mulberry leaves during *in vitro* digestion and colonic fermentation[J]. Food Research International, 2023, 165: 112493.
[18] YANG M, JIANG Z, WEN M, et al. Chemical variation of Chenpi (*Citrus* peels) and corresponding correlated bioactive compounds by LC-MS metabolomics and multibioassay analysis[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 825381.
[19] AKHTAR H M S, Abdin M, Hamed Y S, et al. Physicochemical, functional, structural, thermal characterization and *α*-amylase inhibition of polysaccharides from chickpea (*Cicer arietinum* L.) hulls[J]. LWT, 2019, 113: 108265.
[20] 王胜宇, 杨梅, 胡鹤宇, 等. 结合态酚类物质在植物生长、食品加工及人体消化过程中的释放规律研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 408−417. [WANG S Y, YANG M, HU H Y, et al. Research progress on release patterns of conjugated phenolics during plant growth, food processing and human digestion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 408−417.]
[21] 石志娇, 韦桂芳, 何旭华, 等. 体外模拟消化对黑果腺肋花楸叶片抗氧化及抑制糖消化酶活性影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(14): 147−153. [SHI Z J, WEI G F, HE X H, et al. Effects of simulated digestion *in vitro* on activities of antioxidant and sugar digestion enzyme inhibition in Aronia *melanocarpa* leaves[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(14): 147−153.]
[22] 王若辉. 不同成熟度和干燥方式下核桃仁多酚组成及涩味关联性[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2022. [WANG R H. Profile of phenolic compounds in walnut kernels and its correlation with astringency under different maturity and drying conditions[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2022.]
[23] ZHENG L X, CHEN X Q, CHEONG K L. Current trends in marine algae polysaccharides: The digestive tract, microbial catabolism, and prebiotic potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 344−354.
[24] 谢乐怡, 张兵, 李红艳. 绿茶、橘皮、大豆中酚类物质体外消化前后稳定性及抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 374−382. [XIE L Y, ZHANG B, LI H Y. Study on the stability and antioxidant activity of phenolics in green tea, citrus peel and soybean before and after *in vitro* digestion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 374−382.]
[25] LI Q, LIU F, LIAO S, et al. Targeted and non-targeted metabolic characteristics of 6, 7-dihydroxy-2, 4-dimethoxyphenanthrene during simulated gastrointestinal digestion[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141534.
[26] 汪芙蓉. 体外模拟消化对酚类化合物稳定性和抗氧化活性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [WANG F R. Stability and antioxidant activity of phenolie compounds during *in vitro* digestion [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.]
[27] 贾晓燕, 胡朋朋, 王佩欣, 等. 覆盆子单宁富集组分消化稳定性及对肠道菌群的调节作用[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 104−113. [JIA X Y, HU P P, WANG P X, et al. Digestive stability of tannin-enriched fraction of *Rubus chingii* Hu fruits and its regulatory effect on the intestinal microflora[J]. Food Science, 2023, 44(9): 104−113.]
[28] 江宇柔, 余强, 李格菲, 等. 基于缔合胶体稳态重构思路的中药多酚口服液稳定性改善研究: 以三勒浆口服液为例[J]. 中草药, 2024, 55(22): 7625−7632. [JIANG Y R, YU Q, LI G F, et al. A study on improving the stability of oral polyphenol preparations from traditional chinese medicine based on the concept of steady-state reconfiguration of association colloids: A case study of sanlejiang oral solution[J]. Traditional Chinese medicine, 2024, 55(22): 7625−7632.]
[29] LV J, REN Z, NIU J, et al. Comparative analysis of phenolic acids inhibition on pepsin activity: Insights from spectroscopy and molecular docking[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2025, 19(11): 9090−9101.
[30] ZHANG Z, LIU P, ZHANG B, et al. *De novo* biosynthesis of caffeic acid and chlorogenic acid in escherichia coli via enzyme engineering and pathway engineering[J]. ACS Synthetic Biology, 2025, 14(5): 1581−1593.
[31] LOPEZ-RODULFO I M, GALLEGO-LOBILLO P, MARTINEZ M M. Pancreatic lipase exhibits selective esterase activity on carboxyl-linked hydroxycinnamic acid glucosides[J]. Food Chemistry, 2025, 488: 144939.
[32] 朱鹏, 苗潇磊, 陈勇. 绿原酸、隐绿原酸和新绿原酸在中性和碱性 pH 条件下的降解动力学[J]. 药学学报, 2016, 51(1): 122−126. [ZHU P, MIAO X L, CHEN Y. Degradation kinetics of chlorogenic acid, cryptochlorogenic acid, and ne. ochlorogenic acid at neutral and alkaline pH values[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2016, 51(1): 122−126.]
[33] HOLLMAN P C H, KATAN M B. Dietary flavonoids: intake, health effects and bioavailability[J]. Food and chemical toxicology, 1999, 37(9−10): 937−942.
[34] CHEN X, XU Y, DU X, et al. Effect of *Porphyra haitanensis* polyphenols from different harvest periods on hypoglycaemic activity based on *in vitro* digestion and widely targeted metabolomic analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137793.
[35] VESELY O, BALDOVSKA S, KOLESAROVA A. Enhancing

bioavailability of nutraceutically used resveratrol and other stilbenoids[J]. Nutrients, 2021, 13(9): 3095.
[36] 蒋雨心, 范方宇, 陈成, 等. 玉米醇溶蛋白/鱼腥草黄酮复合纳米颗粒的制备及胃肠道释放特性[J]. 精细化工, 2024, 41(6): 1345−1353,1361. [JIANG Y X, FAN F Y, CHEN C, et al. Preparation and gastrointestinal release characteristics of zein/ *Houttuynia* cordata flavonoids composite nanoparticles[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(6): 1345−1353,1361.]
[37] JIN X, RU Y, ZHANG X, et al. The influence of *in vitro* gastrointestinal digestion and fecal fermentation on the flowers of *Juglans regia*: Changes in the active compounds and bioactivities [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1014085.
[38] MORZEL M, CANON F, GUYOT S. Interactions between salivary proteins and dietary polyphenols: Potential consequences on gastrointestinal digestive events[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(21): 6317−6327.
[39] WU Q, ZHAO D, LENG Y, et al. Identification of the hypoglycemic active components of *Lonicera japonica* Thunb. and *Lonicera hypoglauca* Miq by UPLC-Q-TOF-MS[J]. Molecules, 2024, 29(20): 4848.
[40] XING X, CHUN C, QIANG H, et al. Investigation into the mechanisms of quercetin-3-O-glucuronide inhibiting *α*-glucosidase activity and non-enzymatic glycation by spectroscopy and molecular docking[J]. Food & Function, 2021, 12(17): 7825−7835.
[41] ROCHA S, VICENTE B, PORENCA C, et al. Herbacetin inhibits human fructose 1, 6-bisphosphatase among a panel of chromone derivatives and pyrazoles, demonstrating positive effects on insulin - resistant HepG2 Cells[J]. Chemical Biology & Drug Design, 2024, 104(5): e70017.
[42] ZHANG Y, LI Y, ZHAI Y, et al. Inhibitory mechanism of chrysin and diosmetin to *α*-glucosidase: Insights from kinetics, multispectroscopy and molecular docking investigations[J]. Journal of Biomolecular Structure and Dynamics, 2024: 1−13.
[43] YANG J, WANG X, ZHANG C, et al. Comparative study of inhibition mechanisms of structurally different flavonoid compounds on *α*-glucosidase and synergistic effect with acarbose[J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129056.
[44] CHEN J, MANGELINCKX S, MA L, et al. Caffeoylquinic acid derivatives isolated from the aerial parts of *Gynura divaricata* and their yeast *α*-glucosidase and PTP1B inhibitory activity[J]. Fitoterapia, 2014, 99: 1−6.
[45] PRIYA P S, PAVITHRA V, VASISHNAVI S, et al. Understanding the mechanisms and implications of acacetin in mitigating diabetic osteoporosis: Insights from a zebrafish model[J]. Process Biochemistry, 2023, 134: 63−74.
[46] KRISHNAN B, GANESAN A R, BALASUBRAMANI R, et al. Chrysoeriol ameliorates hyperglycemia by regulating the carbohydrate metabolic enzymes in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 346−354.
[47] QIAN J, ZHANG J, CHEN Y, et al. Hypoglycemic activity and mechanisms of myricetin[J]. Natural Product Research, 2022, 36(23): 6177−6180.
[48] LI H, ZHANG Y, LIU Z, et al. Exploring antioxidant activities and inhibitory effects against *α*-amylase and *α*-glucosidase of *Elaeocarpus braceanus* fruits: Insights into mechanisms by molecular docking and molecular dynamics[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(1): 343−355.
[49] ZENG L, ZHANG G, LIN S, et al. Inhibitory mechanism of apigenin on *α*-glucosidase and synergy analysis of flavonoids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(37): 6939−6949.
[50] WANG X, YANG J, LI H, et al. Mechanistic study and synergistic effect on inhibition of *α*-amylase by structurally similar flavonoids[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119485.
[51] 邢宇航, 郑烨宇, 薛璐, 等. 不同品种芒果核中多酚类化合物的鉴定及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 63−70. [XING Y H, ZHENG Y Y, XUE L, et al. Identification and antioxidant activity analysis of polyphenols in different Mango kernels cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 63−70.]
[52] 李慧卿, 曹叶霞, 黄坊娇. DPPH·和 $ABTS^{+}$·比较研究毛建草多酚、黄酮和多糖的抗氧化协同作用[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 98−105. [LI H Q, CAO Y X, HUANG F J. Comparative study of DPPH· and $ABTS^{+}$· methods on the antioxidant synergistic effects of polyphenols, flavonoids and polysaccharides of *Dracocephalum rupestre* Hance[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 98−105.]