

红仁核桃内种皮提取物体外模拟消化的抗氧化活性研究

王 涛^{1,2}, 李佳艺¹, 韩晓江^{1,2}, 郭耀东^{1,2}

¹商洛学院健康管理学院, 陕西 商洛

²陕西“四主体一联合”陕西秦岭健康食品配料及核桃产业技术校企联合研究中心, 陕西 商洛

收稿日期: 2025年8月2日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

为研究红仁核桃内种皮消化后总酚、总黄酮活性物质在口腔、胃、小肠中的含量变化及抗氧化情况。通过对口腔、胃、小肠体外模拟对红仁核桃内种皮提取物进行消化, 分别在胃、肠消化0 min、30 min、60 min、90 min、120 min后取样, 测定红仁核桃内种皮在不同消化阶段总酚、总黄酮的变化以及在不同消化阶段的DPPH自由基清除能力、ABTS自由基清除能力。研究表明: 经口腔模拟消化后, 红仁核桃内种皮总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性与消化前相比略微下降; 经胃模拟消化后, 红仁核桃内种皮总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性与消化前相比显著上升($P < 0.05$); 而经过小肠模拟消化后, 红仁核桃内种皮总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性与消化前相比显著下降($P < 0.05$)。

关键词

红仁核桃内种皮, 体外模拟消化, 总酚, 抗氧化活性

Antioxidant Activity of Inner Seed Coat Extract of Red Kernel Walnut Simulated Digestion *in Vitro*

Tao Wang^{1,2}, Jiayi Li¹, Xiaojiang Han^{1,2}, Yaodong Guo^{1,2}

¹College of Health Management, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

²Shaanxi “Four Subjects and One Union” Qinling Health Food Ingredients and Walnut Industry Technology School-Enterprise Research Center, Shangluo Shaanxi

Received: Aug. 2nd, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

文章引用: 王涛, 李佳艺, 韩晓江, 郭耀东. 红仁核桃内种皮提取物体外模拟消化的抗氧化活性研究[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(5): 649-661. DOI: 10.12677/hjfn.2025.145071

Abstract

This study aimed to investigate the changes in the contents of bioactive substances, namely total phenols and total flavonoids, derived from the digested inner seed coat of red kernel walnut, as well as their antioxidant properties, throughout the oral, gastric, and intestinal phases. By conducting *in vitro* simulated digestion of the inner seed coat extract of red walnut using oral, gastric, and intestinal models, samples were collected at 0 min, 30 min, 60 min, 90 min, and 120 min during gastric and intestinal digestion. The changes in total phenols and total flavonoids in the inner seed coat of red kernel walnut at different digestion stages, as well as its DPPH radical scavenging capacity and ABTS radical scavenging capacity at these stages, were then determined. The results showed that after oral simulated digestion, the content of total phenols, total flavonoids and antioxidant activity in the inner seed coat of red kernel walnut decreased slightly compared with that before digestion. After gastric simulated digestion, the contents of total phenols, total flavonoids and antioxidant activity in the inner seed coat of red kernel walnut increased significantly compared with those before digestion ($P < 0.05$). After simulated digestion in the small intestine, the contents of total phenols, total flavonoids and antioxidant activity in the inner seed coat of red kernel walnut decreased significantly compared with those before digestion ($P < 0.05$).

Keywords

Inner Seed Coat of Red Kernel Walnut, *In Vitro* Simulated Digestion, Total Phenols, Antioxidant Activity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核桃内种皮, 是包裹核桃种仁的一层种皮结构, 其所含酚类物质的浓度远超核桃仁本身[1]。核桃内种皮含有丰富的维生素、矿物质、蛋白质和脂质等物质, 营养价值较高, 其薄膜结构有效地抑制了种仁的氧化降解, 对果实生长及采后的品质维持至关重要, 其中的多酚类物质主要是酚酸、可水解单宁, 并含有许多脂质和少量的黄酮[2]-[4]。王克建等[5]对红瓢核桃种皮进行分析证实了其种皮中含有花色苷。李琳等[6]观察了红瓢核桃的生物学特性并对其种仁营养成分进行了分析。红仁核桃内种皮中的酚类物质含量较核桃仁更为丰富, 主要包括类黄酮、苯醌、酚酸等活性成分, 具有良好的抗氧化活性, 有延缓人体衰老、健脑益智、降血糖、抗癌、抑菌等多方面功效[7][8]。Persic 等[9]研究发现红仁核桃中含量最多的酚类化合物是香草酸己苷, 另一研究红仁核桃成熟过程中酚类物质的变化, 发现红色和棕色品种最大的差异在于前者苯丙氨酸解氨酶、花青素合成酶基因表达增加。

酚类物质在人体内的有效释放及其生物功能的发挥, 与其消化、吸收和代谢过程紧密相关, 探究酚类物质经消化后的变化情况至关重要。而在生物体内, 消化过程涵盖口腔、胃和肠道等多个阶段, 物质经过胃和肠道阶段会与体内的消化酶发生作用, 涉及物理化学反应, 食物会发生转化、降解、不完全释放等反应, 从而影响食物的功效性[10]。体外消化模拟是选择与生物相近的 pH 值、温度条件和主要消化酶去创造接近人体消化环境的方法, 检测摄入体内的物质消化吸收情况, 评估消化过程对于活性物质的影响[11]。

由于生物活性物质在真实人体内的消化吸收过程非常复杂, 存在成本高、耗时长且具有一定的伦理

学问题，研究胃肠道消化吸收对食物的影响过程中存在很多困难，更多的学者开始采用体外模拟胃肠道消化的方法去研究食品在胃肠的消化吸收。体外模拟胃肠消化具有快速、廉价、不受伦理限制、重复性高等优势，在食品和营养科学的许多领域被广泛应用[12] [13]。向卓亚等[14]在藜麦体外消化中发现抗氧化性与多酚类 and 黄酮类物质释放量呈显著正相关。李贻等[15]研究发现，刺梨在模拟胃肠道消化后其多酚、黄酮化合物含量及其 DPPH 自由基清除能力等均有明显的上升趋势，表明模拟胃肠道消化能促进刺梨中抗氧化成分的释放并使其抗氧化活性提升。

本研究以红仁核桃内种皮提取物为试验对象，基于体外模拟消化系统，在消化过程中分别于口腔、胃、小肠进行试验，筛选出红仁核桃内种皮提取物抗氧化活性较强的阶段，为实现核桃资源的深度开发利用，进一步为核桃多酚、黄酮类化合物作为天然抗氧化剂开发提供理论基础。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

本研究所用试验材料与试剂如表 1 所示。

Table 1. Test materials and reagents
表 1. 试验材料与试剂

材料/试剂名称	用量/规格	厂家
红仁核桃	500 g	商洛特产馆
无水乙醇	AR	天津新技术产业园区科茂化学试剂有限公司
α -淀粉酶	BR	上海麦克林生化科技股份有限公司
氯化钠	AR	天津市大茂化学试剂厂
盐酸	AR	天津新技术产业园区科茂化学试剂有限公司
胃蛋白酶	1:10,000	上海麦克林生化科技股份有限公司
氢氧化钠	AR	天津市大茂化学试剂厂
胰蛋白酶	1:250	上海麦克林生化科技股份有限公司
没食子酸	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司
福林酚	AR	北京索莱宝科技有限公司
亚硝酸钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
硝酸铝	AR	国药集团化学试剂有限公司
芦丁	98%	上海麦克林生化科技股份有限公司
DPPH	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司
ABTS	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司

2.2. 仪器与设备

本研究所用试验仪器与设备如表 2 所示。

Table 2. Test instruments and equipment
表 2. 试验仪器与设备

仪器名称	厂家
电子天平	日本岛津公司
KQ3200DE 数控超声波清洗器	昆山市超声仪器有限公司
旋转蒸发仪	优莱博技术(北京)有限公司
真空冷冻干燥机	北京松源华兴科技发展有限公司
HZS-HA 超级水浴恒温振荡器	常州金坛精达仪器制造有限公司
DK-2000-IIIIL 水浴锅	菲斯福仪器(河北)有限公司
电热鼓风干燥箱	天津市泰斯特仪器有限公司
PH 计	上海仪电科学仪器股份有限公司
涡旋混匀仪	广州易测仪器有限公司
紫外可见分光光度计	安捷伦科技有限公司

2.3. 实验方法

2.3.1. 红仁核桃内种皮提取液制备

采用机械法对红仁核桃进行去皮并碾碎，称取 30.00 g 碾碎核桃皮，采取超声辅助方法提取，温度为 45℃、时间为 60 min、功率为 500 W，提取溶剂为 80%乙醇、料液比为 1:80 (g/mL)条件下超声提取，残渣在相同条件下再重复提取两次，合并三次上清液，过滤。利用旋转蒸发仪减压浓缩，温度 45℃，转速 60 rpm，待冷凝管不滴水即可。用真空冷冻干燥机冷冻干燥浓缩液，12 h 后得到提取物，将其研磨成粉末用蒸馏水 1:45 溶解，得到红仁核桃内种皮提取液。

2.3.2. 体外模拟消化

1) 口腔模拟消化

参照倪香艳等[16]的方法并进行改进。在离心管中加入 10 mL 提取液、10 mL 蒸馏水和 1 mL α -淀粉酶，置于 37℃水浴中以 100 rpm 振荡 10 分钟。随后，取上清液于 70℃灭酶 3 分钟并保存。最终，进行总酚、总黄酮含量及抗氧化活性的测定。

2) 胃模拟消化

参照李傲等[17]的方法并进行改进。取 60 分钟口腔模拟消化后的混合液 8 mL，先后加入 100 mL 0.9% NaCl 溶液和 0.5 mL 1 mol/L HCl，再添加 10 mL pH 1.5 的含 160 mg 胃蛋白酶的模拟胃液，37℃避光静置。在 100 rpm 转速下，分别于 0、30、60、90、120 分钟取样，检测上清液中总酚、总黄酮含量及抗氧化活性。另设生理盐水对照组。

3) 小肠模拟消化

参照闵芳芳等[18]的方法并进行改进。向胃模拟消化后的混合液中逐渐加入 0.5 mol/L NaOH 调整 pH 至 7.5，随后加入 20 mL 模拟肠液，搅拌均匀后于 37℃避光放置。在 100 rpm 转速下，分别于 0、30、60、90、120 分钟取样，测定上清液的总酚、总黄酮含量及抗氧化活性。

以上实验测定重复三次，取平均值数据。

2.3.3. 生物活性物质的测定

1) 总酚含量的测定

总酚的测定参考标准 T/GZCX 020-2022 [19]。总酚含量(以没食子酸计)通过以下公式计算:

$$X = \frac{(C - C_0) \times V \times f}{m \times 100}$$

其中, X 为样品中总酚的含量(mg/g); C 为样品中总酚的浓度($\mu\text{g/mL}$); C_0 为空白中总酚的浓度($\mu\text{g/mL}$); m 为称取样品的质量(g); V 为提取液体积(mL); f 为稀释倍数。计算结果四舍五入至小数点后两位。

2) 总黄酮含量的测定

总黄酮的测定参考标准 T/NAIA 0188-2023 [20]。总黄酮含量(ω , mg/g)按公式计算:

$$\omega = \frac{(\rho - \rho_0) \times V_1 \times V_3}{m \times V_2 \times 100}$$

其中, ρ 为试样总黄酮浓度(mg/L), ρ_0 为空白样浓度(mg/L), V_1 为提取溶液体积(mL), V_3 为最终定容体积(mL), m 为试样质量(g), V_2 为分取体积(mL)。计算结果保留三位有效数字。

2.3.4. 抗氧化活性的测定

1) DPPH 自由基清除率的测定

DPPH 自由基清除率的测定参照付丽红等[21]的方法。

取样品待测液 3 mL, 加入 3 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液, 摇匀避光反应 12 min, 静置 10 min 后, 于波长 517 nm 处测吸光度。DPPH 清除率计算见式:

$$\text{DPPH清除率} = \frac{A_1 - (A_2 - A_3)}{A_1} \times 100\%$$

式中: A_2 为样品组吸光度; A_1 为空白组吸光度; A_3 为对照组吸光度。

2) ABTS 自由基清除率的测定

ABTS 自由基清除率的测定参照林心健等[22]的方法。ABTS 清除率计算见式:

$$\text{ABTS清除率} = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\%$$

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

2.4. 数据处理

全部实验均重复 3 次, 取平均值。数据分析采用 Excel 2021 和 SPSS 27.0 软件, 结果以均值 $\pm$ 标准差呈现, 显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

3. 结果与分析

3.1. 体外模拟消化红仁核桃内种皮总酚含量变化结果

根据图 1 可知, 消化前红仁核桃内种皮提取物总酚含量为 153.21 mg/g, 经过口腔模拟消化后, 红仁核桃内种皮总酚含量为 149.87 mg/g, 与消化前相比无显著差异($P > 0.05$)。

根据图 2 可知, 在经过胃液模拟消化 2 h 后, 红仁核桃内种皮总酚含量明显上升, 达到 183.64 mg/g, 与消化前相比差异显著($P < 0.05$), 说明胃液模拟消化过程对核桃中游离态多酚的析出具有显著促进作用。这可能是因为胃蛋白酶会分解大分子蛋白质, 从而使一些被蛋白质包围的多酚类物质释放出来, 同时胃

蛋白酶也会减弱部分酚酸与细胞壁之间的酯键,使酚酸得以脱离[23],酸性环境有利于抗氧化物质释放,多酚类物质在低 PH 值下发生水解,一些苷类化合物变成相应苷元,使多酚含量有所上升。

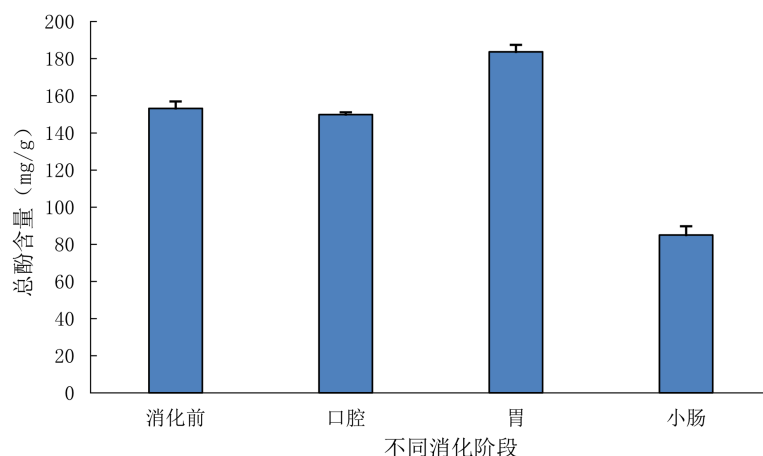


Figure 1. Changes in total phenolic content of inner seed coat extract of red kernel walnut at different digestion stages

图 1. 红仁核桃内种皮提取物在不同消化阶段总酚含量变化

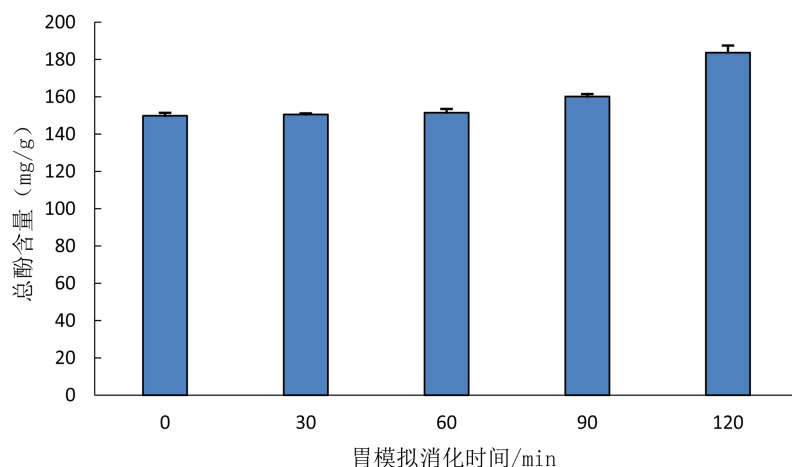


Figure 2. Changes in total phenolic content during gastric simulated digestion of inner seed coat extract of red kernel walnut

图 2. 红仁核桃内种皮提取物胃模拟消化过程总酚含量变化

根据图 3 可知,在经历了小肠模拟消化 2 h 阶段之后,研究观察到样品内的总酚类物质含量出现了明显下降趋势,其含量为 84.98 mg/g,甚至低于未经消化处理的原始样本水平,未消化前的总酚含量是经肠液模拟消化后的 1.8 倍,与消化前相比差异显著($P < 0.05$)。可能由于酚类化合物的代谢转化及其降解过程主要发生在肠道环境中。在此生理区域内,由于趋向碱性的 pH 条件,大多数酚类物质的化学稳定性受到不利影响,导致它们逐渐发生结构改变和降解反应,进而导致多酚含量降低。

3.2. 体外模拟消化红仁核桃内种皮总黄酮含量变化结果

根据图 4 可知,消化前红仁核桃内种皮提取物总黄酮含量为 0.096 mg/g,未经消化时,红仁核桃内种皮总黄酮含量低,其原因可能是红仁核桃内种皮中单宁和游离多酚的高含量与黄酮形成复合物,抑制了黄酮的提取,同时种皮自身的黄酮含量较低。经过口腔模拟消化后,红仁核桃内种皮总黄酮含量为 0.093 mg/g,略有下降,但与消化前相比无显著差异($P > 0.05$)。

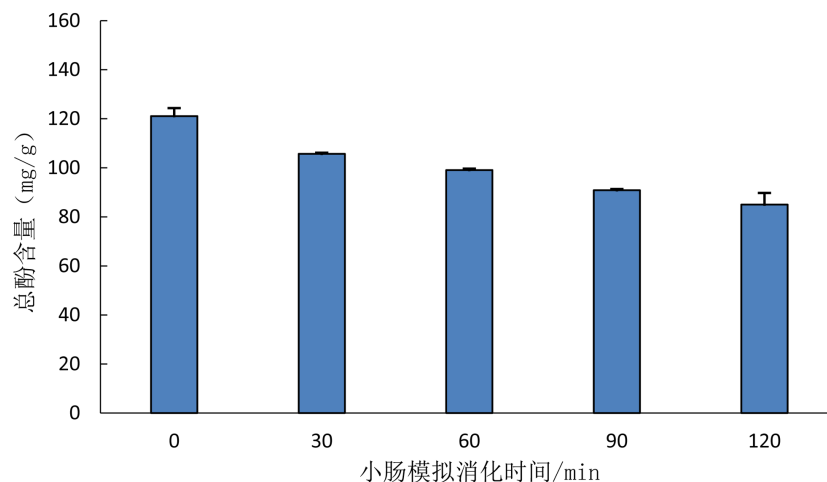


Figure 3. Changes in total phenolic content during simulated digestion in the small intestine of inner seed coat extract of red kernel walnut

图 3. 红仁核桃内种皮提取物小肠模拟消化过程总酚含量变化

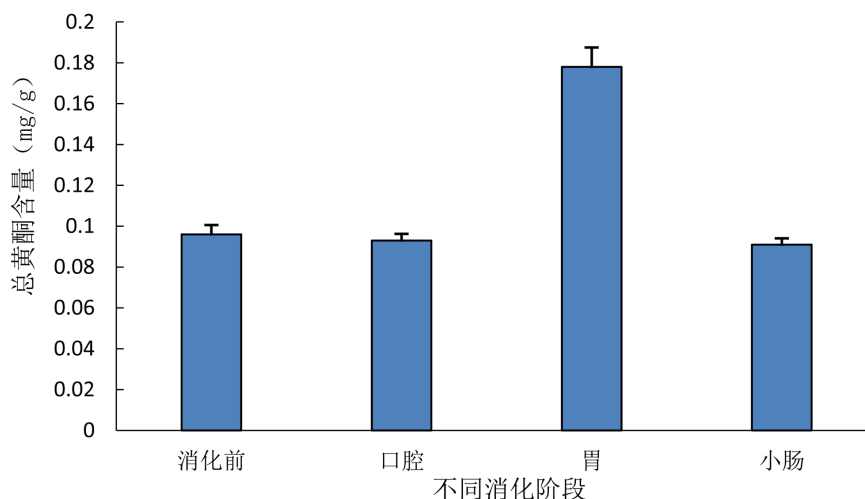


Figure 4. Changes in total flavonoid content of inner seed coat extract of red kernel walnut at different digestion stages

图 4. 红仁核桃内种皮提取物在不同消化阶段总黄酮含量变化

根据图 5 可知,在经过胃液模拟消化 2 h 后,红仁核桃内种皮总黄酮含量达到 0.178 mg/g,与消化前相比差异显著($P < 0.05$)。黄酮类化合物在体外模拟消化过程中的动态变化模式与总酚类物质含量的波动呈现出高度一致性。具体而言,随着消化进程由胃部向肠道推进,黄酮类化合物的浓度在胃液模拟消化阶段经历了一个上升的趋势,而在后续的肠液模拟消化环节则观察到了一个急剧的含量减少现象。这是由于从酸性的胃液环境中过渡到中性或弱碱性的肠液环境,多酚容易降解为酚醛或其他化合物,造成酚类黄酮类物质含量减少[24]。

根据图 6 可知,在经历了肠道模拟消化 2 h 阶段之后,红仁核桃内种皮提取物总黄酮含量为 0.091 mg/g,相对于胃液模拟消化阶段,总黄酮释放量下降显著($P < 0.05$)。黄酮含量在各个消化阶段展现出的差异性,可能源于各阶段独特的 pH 环境及消化酶组成之异质性。随着消化过程的递进,不同阶段的酶促水解效率存在显著区别,这直接影响黄酮类化合物的释放速率和总量。此外,在碱性条件下,黄酮类化合物表现出极高的不稳定性,易于经历降解反应,转化为更小的分子结构。

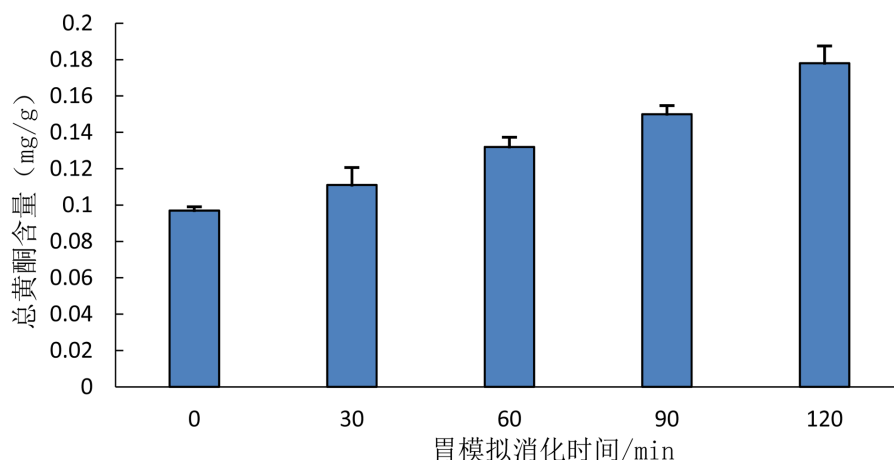


Figure 5. Changes in total flavonoid content during gastric simulated digestion of inner seed coat extract of red kernel walnut
图 5. 红仁核桃内种皮提取物胃模拟消化过程总黄酮含量变化

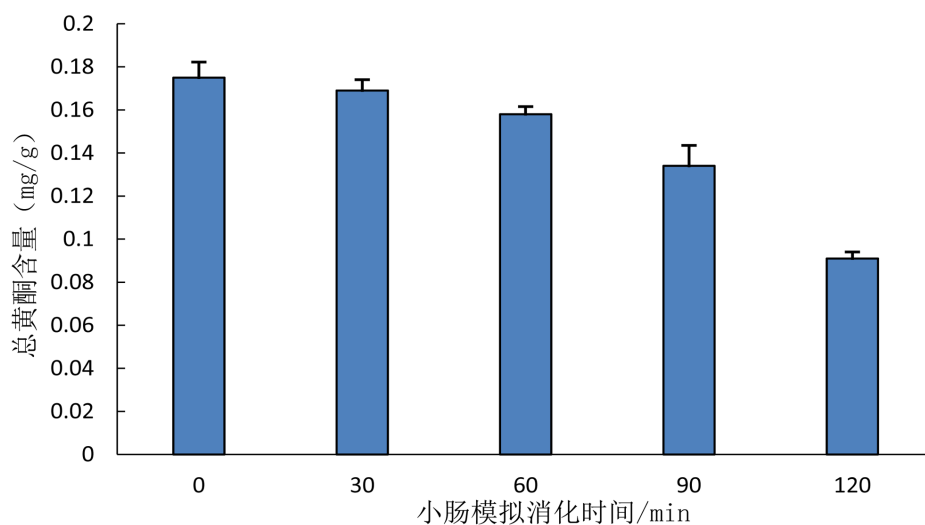


Figure 6. Changes in total flavonoid content during simulated intestinal digestion of the inner seed coat extract of red kernel walnut
图 6. 红仁核桃内种皮提取物小肠模拟消化过程总黄酮含量变化

3.3. DPPH 自由基清除率测定结果

根据图 7 可知, 消化前红仁核桃内种皮提取物 DPPH 自由基清除率达到 33.28%, 因为红仁核桃内种皮富含多酚, 特别是儿茶素和原花青素, 它们可能通过捐赠氢离子或电子有效清除 DPPH 自由基, 加之黄酮类化合物亦可能参与抗氧化, 共同赋予未消化种皮高 DPPH 自由基清除率, 凸显其优异的天然抗氧化潜能。经口腔模拟消化后, 红仁核桃内种皮总酚含量为 27.43%, 下降了 5.85%, 与消化前相比差异显著($P < 0.05$)。

根据图 8 可知, 在经过胃液模拟消化 2 h 后, 随着体外模拟胃消化的不断进行, 红仁核桃内种皮经过胃模拟消化后, DPPH 自由基清除率增加至 43.68%, 显著高于消化前和口腔模拟消化组($P < 0.05$)。

根据图 9 可知, 在经历了肠道模拟消化 2 h 阶段之后, DPPH 自由基清除率为 26.83%, 与消化前相比下降了 6.45%, 与消化前相比差异显著($P < 0.05$)。结果表明, 红仁核桃内种皮经过体外模拟消化后, 其对 DPPH 自由基清除能力呈下降趋势。

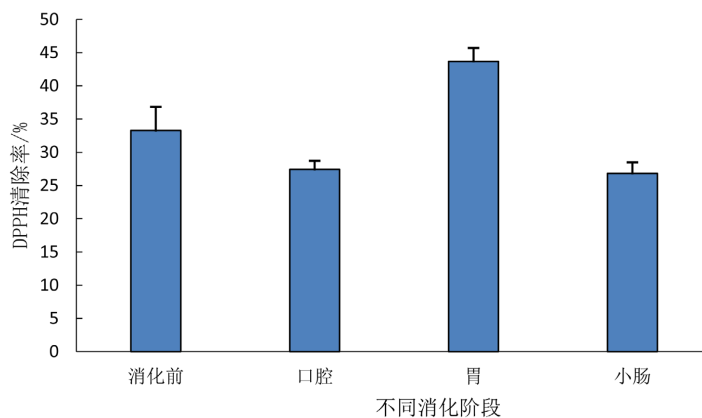


Figure 7. Changes in DPPH free radical scavenging rate of inner seed coat extract of red kernel walnut at different digestion stages

图 7. 红仁核桃内种皮提取物在不同消化阶段 DPPH 自由基清除率变化

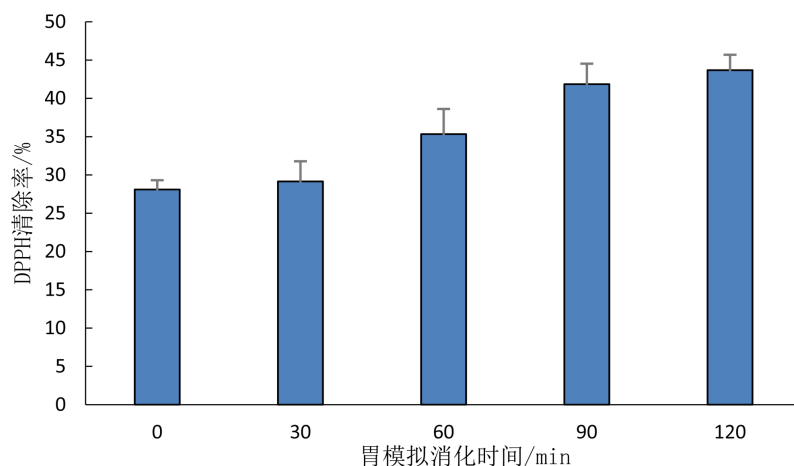


Figure 8. Changes in DPPH free radical scavenging rate during gastric simulated digestion of red kernel walnut inner seed coat extract

图 8. 红仁核桃内种皮提取物胃模拟消化过程 DPPH 自由基清除率变化

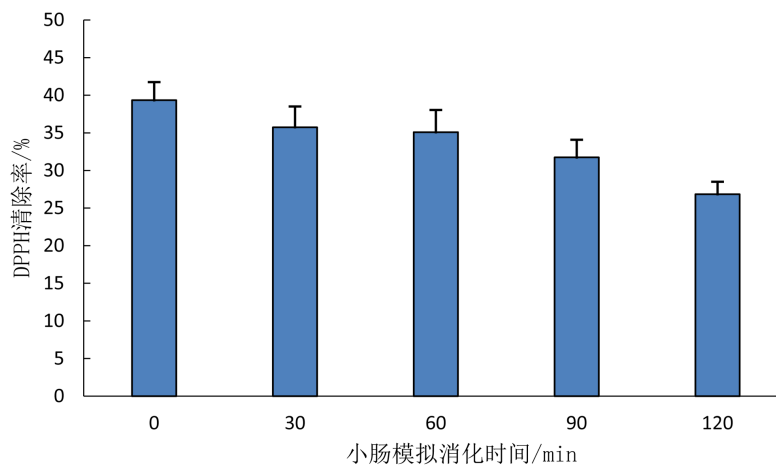


Figure 9. Changes in DPPH free radical scavenging rate of inner seed coat extract of red kernel walnut in the small intestine during simulated digestion

图 9. 红仁核桃内种皮提取物小肠模拟消化过程 DPPH 自由基清除率变化

3.4. ABTS 自由基清除率测定结果

根据图 10 可知, 消化前红仁核桃内种皮提取物 ABTS 自由基清除率达到 84.31%。红仁核桃内种皮富含的多酚化合物展现出了强大的抗氧化潜力。这些多酚分子通过高效的氢或电子供体机制, 显著提高了对 ABTS 自由基的清除效率, 同时, 内种皮中存在的黄酮类化合物亦可能通过协同作用, 进一步加强了自由基的清除能力。经过口腔模拟消化后, 核桃内种皮 ABTS 自由基清除率为 75.29%, 下降了 9.02%, 与消化前相比差异显著($P < 0.05$)。

根据图 11 可知, 在经过胃液模拟消化 2 h 后, 其清除 ABTS 自由基的能力显著上升, ABTS 自由基清除率为 93%, 与消化前相比, 增加了 8.69%, 显著高于消化前和口腔模拟消化组($P < 0.05$)。

根据图 12 可知, 在经历了肠道模拟消化 2 h 阶段之后, 红仁核桃内种皮提取物 ABTS 自由基清除率为 61.92%, 其清除 ABTS 自由基能力再次下降, 与消化前相比下降了 22.39%, 下降幅度较大。结果表明, 红仁核桃内种皮经过体外模拟消化后, 其对 ABTS 自由基清除能力呈下降趋势, 其中经胃液模拟消化 120 min 后的 ABTS 自由基清除率显著高于其它消化组($P < 0.05$)。

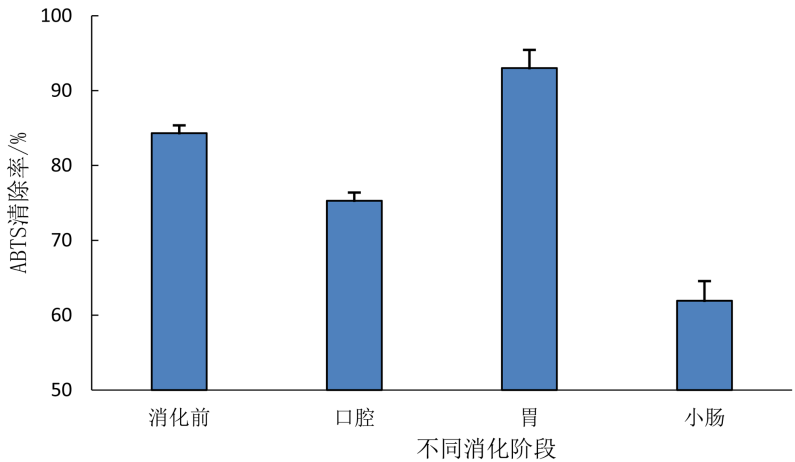


Figure 10. Changes of ABTS free radical scavenging rate of inner seed coat extract of red kernel walnut at different digestion stages

图 10. 红仁核桃内种皮提取物在不同消化阶段 ABTS 自由基清除率变化

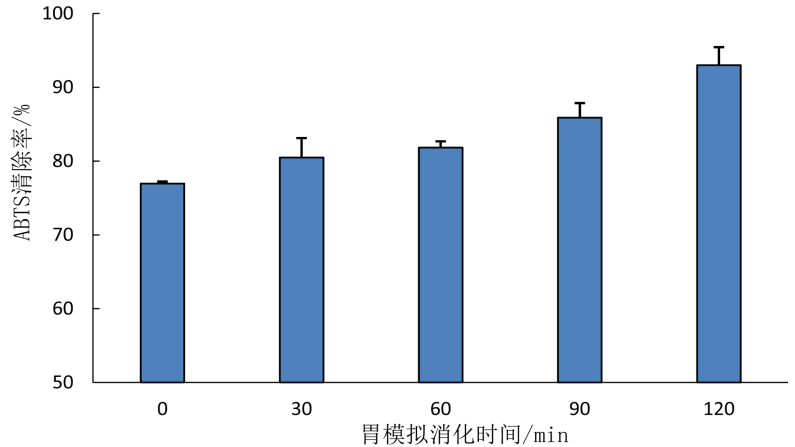


Figure11. Changes in ABTS free radical scavenging rate of inner seed coat extract of red kernel walnut during gastric simulated digestion

图 11. 红仁核桃内种皮提取物胃模拟消化过程 ABTS 自由基清除率变化

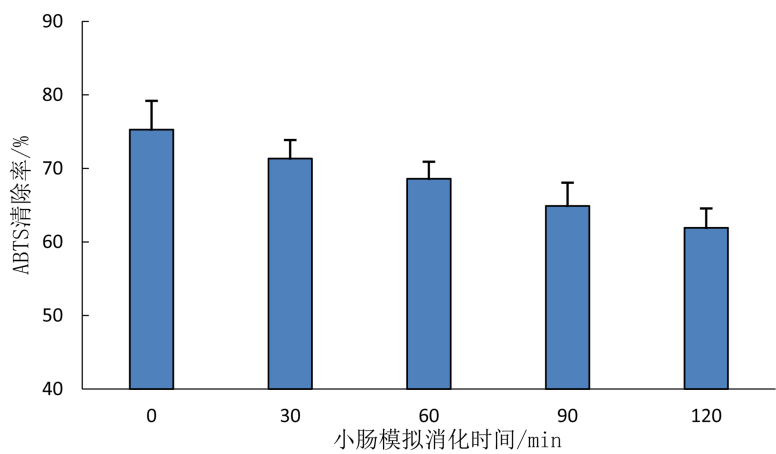


Figure12. Changes in ABTS free radical scavenging rate of inner seed coat extract of red kernel walnut in small intestine during simulated digestion

图 12. 红仁核桃内种皮提取物小肠模拟消化过程 ABTS 自由基清除率变化

3.5. 红仁核桃内种皮体外模拟消化抗氧化活性成分与抗氧化活性的相关性结果

经过对红仁核桃内种皮体外模拟消化后抗氧化能力分析，发现红仁核桃内种皮抗氧化能力经消化道后的变化规律与红仁核桃内种皮经体外模拟消化后含量的变化一致。通过进行皮尔森相关性检验，红仁核桃内种皮经体外模拟消化后总酚、总黄酮与抗氧化活性之间的关联性分析结果如表 3 所示。从表中可以看出，在体外模拟消化过程中，红仁核桃内种皮总酚浓度与它清除 DPPH 自由基活性的相关性达到了 0.335，具有明显的相关性($P < 0.05$)，与 ABTS 自由基活性的相关性达到了 0.930，具有非常明显的相关性($P < 0.01$)，红仁核桃内种皮总黄酮浓度与它清除 ABTS 自由基活性的相关性达到了 0.817，具有非常明显的相关性 ($P < 0.01$)。关联性分析结果表明总酚含量与 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率，总黄酮含量与 ABTS 自由基清除率密切相关，是影响其消化过程中抗氧化能力变化的关键因素。

Table 3. Correlation between antioxidant active components and antioxidant activity of inner seed coat extract of red kernel walnut

表 3. 红仁核桃内种皮提取物抗氧化活性成分与抗氧化活性的相关性

相关系数	DPPH 自由基清除率	ABTS 自由基清除率
红仁核桃内种皮总酚含量	0.335*	0.930**
红仁核桃内种皮总黄酮含量	0.212	0.817*

注：**水平为 0.01 (双尾)，具有极高的相关性；*在水平为 0.05 (双尾)时，相关性达到了高水平。

4. 讨论与结论

本研究通过建立体外模拟口腔、胃肠道消化模型，比较研究了在口腔、胃、小肠红皮核桃内种皮抗氧化活性的变化。结果发现红皮核桃内种皮经体外模拟消化后总酚、总黄酮含量及抗氧化能力下降。红皮核桃内种皮经口腔模拟消化后含量下降，可能与红皮核桃内种皮会通过特异性作用直接与 α -淀粉酶结合形成大分子化合物，形成不溶性聚合物。在胃模拟消化阶段，胃液模拟消化阶段对多酚化合物的转化具有积极促进作用。在这一阶段，胃蛋白酶的催化效应使得大量酚类物质得以释放，尤其是单宁类化合物倾向于分解成酚酸类物质，从而导致多酚的总含量上升，伴随这一过程，样品的抗氧化潜能相应提升。Bouayed [25]、Tagliazucchi [26]等的研究均表明，样品经模拟胃液消化后多酚释放量和抗氧化活性有所提

高。然而,在小肠模拟消化阶段,肠道微生物、胆汁及胰酶协同作用导致酚类物质迅速转化与降解,引起酚类物质含量降低,抗氧化效能减退。模拟消化过程导致酚类及黄酮水平下降,伴随 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力的减弱,揭示了活性物质含量与抗氧化效能之间的紧密关联,表明抗氧化性能随活性成分含量的变化同步衰退。

研究聚焦于红皮核桃内种皮提取物中的总酚和总黄酮含量,并通过体外模拟消化实验,评估了生物活性在消化过程中对抗氧化活性的影响。初步实验结果表明,红皮核桃内种皮显示出较强的抗氧化特性。然而,考虑到红皮核桃内种皮提取物在实际应用中所遭遇的多变环境因素,其在功能食品领域的应用前景仍需深入探索。诸如对于红皮核桃内种皮在体外模拟消化后具体会转变成什么物质,还需要对提取出来的总酚、总黄酮应该进一步分离、提纯,确定红皮核桃内种皮提取物在不同生理条件下的化学稳定性和生物利用度。

本研究经口腔模拟消化后,红仁核桃内种皮总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性与消化前相比略微下降;经胃模拟消化后,红仁核桃内种皮总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性与消化前相比显著上升($P < 0.05$);而经过小肠模拟消化后,红仁核桃内种皮总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性与消化前相比显著下降($P < 0.05$)。皮尔森相关性检验表明,在体外模拟消化过程中,红仁核桃内种皮总酚含量与它清除 DPPH 自由基活性的相关性为 0.335,具有明显的相关性($P < 0.05$),红仁核桃内种皮总酚含量与它清除 ABTS 自由基活性的相关性达到了 0.930,具有非常明显的相关性($P < 0.01$);红仁核桃内种皮总黄酮含量与它清除 DPPH 自由基活性的相关性为 0.212,相关性不明显($P > 0.05$),红仁核桃内种皮总黄酮含量与它清除 ABTS 自由基活性的相关性达到了 0.817,具有非常明显的相关性($P < 0.01$)。

基金项目

商洛学院科学研究计划项目(21FK002);大学生创新创业训练计划项目(202411396007)。

参考文献

- [1] Alasalvar, C. and Bolling, B.W. (2015) Review of Nut Phytochemicals, Fat-Soluble Bioactives, Antioxidant Components and Health Effects. *British Journal of Nutrition*, **113**, S68-S78. <https://doi.org/10.1017/s0007114514003729>
- [2] 荣瑞芬, 历重先, 刘雪峥, 等. 核桃内种皮营养与功能成分初步分析研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 541-543.
- [3] 谢素雅, 曹尚桥, 李红波, 等. 核桃内种皮脂质和氨基酸组成分析[J]. 农产品加工, 2022(23): 5-10.
- [4] 冯春艳, 荣瑞芬, 刘雪峥. 核桃仁及内种皮营养与功能成分分析研究进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 408-411, 417.
- [5] 王克建, 郝艳宾, 齐建勋, 等. 红色核桃仁种皮提取物紫外-可见光谱和质谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1668-1671.
- [6] 李琳, 张港港, 张燕, 等. 红瓢核桃遗传和生物学特性观察及种仁品质分析[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(4): 611-621.
- [7] Ozcan, A., Sutyemez, M., Attars, H., et al. (2020) Fatty Acid Composition, Phenolic Compound Content and Antioxidant Activity of Unique Walnut Genotypes with Red Seed Coat. *Journal of Food and Nutrition Research*, **59**, 352-360.
- [8] 朱振宝, 张芳, 段屹帆, 等. 美国红仁核桃及其油脂营养品质评价[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 166-174.
- [9] Persic, M., Mikulic-Petkovsek, M., Slatnar, A., Solar, A. and Veberic, R. (2018) Changes in Phenolic Profiles of Red-Colored Pellicle Walnut and Hazelnut Kernel during Ripening. *Food Chemistry*, **252**, 349-355. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.124>
- [10] 杨瑞丽, 郭卓钊, 施奕乔, 等. 青梅酚类物质在体外模拟消化过程中生物接受率和抗氧化活性的变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 157-163.
- [11] 李玉珍, 肖怀秋, 姜明姣, 等. 体外人模拟胃肠系统在食物消化行为研究中的应用进展. 中国酿造, 2017, 36(7): 153-156.
- [12] 饶雪甜. 黑果腺肋花楸体外消化模拟及其原花青素性质和应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学,

- 2021.
- [13] 熊云霞. 体外模拟消化对苹果和梨的抗氧化活性及抗癌细胞增殖活性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [14] 向卓亚, 邓俊琳, 陈建, 等. 藜麦体外模拟消化过程中酚类物质含量及抗氧化活性的变化[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 283-290.
- [15] 李贻, 贺君, 张鹏敏. 体外模拟胃肠道消化下刺梨抗氧化成分的释放[J]. 现代食品科技, 2020, 36(2): 102-107.
- [16] 倪香艳, 钟葵, 佟立涛, 等. 糙米体外消化过程中酚类物质含量及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 105-111.
- [17] 李俦, 翟宇鑫, 陈军, 等. 南酸枣皮中酚类化合物体外模拟消化与溶剂提取的比较研究[J]. 食品科学, 2015, 36(9): 12-16.
- [18] 闵芳芳, 聂少平, 万宇俊, 等. 青钱柳多糖在体外消化模型中的消化与吸收[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 24-29.
- [19] 漆正方, 孙宜春, 钱品, 等. TGZCX020-2022 刺梨及其制品中总酚含量的测定[S]. 贵阳: 贵州省刺梨行业协会, 2022.
- [20] 马玲, 雷艳, 王忠强, 等. T/NAIA0188-2023 枸杞叶及枸杞茶中总黄酮含量的测定[S]. 银川: 宁夏化学分析测试协会, 2023.
- [21] 付丽红, 李晓斌, 董正中, 等. 雁门苦荞黄酮的分离提取、稳定性及抗氧化活性研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 439-444.
- [22] 林心健, 杨震峰, 戚向阳, 等. 体外模拟消化体系中油茶多酚以及抗氧化活性的变化[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 118-123.
- [23] 陆俊, 敦惠瑜, 向孝哲, 等. 体外模拟胃、肠消化对 6 种黑色食品抗氧化成分及其活性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 47-56.
- [24] 封易成, 牟德华. 体外模拟胃肠消化过程中山楂的活性成分及抗氧化性规律[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 139-145.
- [25] Bouayed, J., Hoffmann, L. and Bohn, T. (2011) Total Phenolics, Flavonoids, Anthocyanins and Antioxidant Activity Following Simulated Gastro-Intestinal Digestion and Dialysis of Apple Varieties: Bioaccessibility and Potential Uptake. *Food Chemistry*, **128**, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.052>
- [26] Tagliazucchi, D., Verzelloni, E., Bertolini, D. and Conte, A. (2010) *In Vitro* Bio-Accessibility and Antioxidant Activity of Grape Polyphenols. *Food Chemistry*, **120**, 599-606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.030>