

体外模拟消化过程中核桃花提取物 抗氧化活性的变化

李如蕊¹, 陈欣¹, 茹月蓉¹, 穆宏磊², 郜海燕², 王振兴¹, 阚欢¹

(1. 西南林业大学生命科学学院, 森林食品研究院, 云南昆明 650224)

(2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 农业农村部果品采后处理重点实验室, 浙江杭州 310021)

摘要: 为研究体外模拟消化过程中核桃花提取物抗氧化活性的变化, 对核桃花提取物依次进行模拟口腔消化、胃消化和小肠消化, 分别采用福林酚法和亚硝酸钠-硝酸铝法测定核桃花提取物在不同消化阶段的总酚和总黄酮含量, 以 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除能力和铁还原能力为指标, 考察核桃花提取物抗氧化活性的变化情况。结果表明: 在口腔消化、胃消化和小肠消化过程中, 核桃花提取物的总酚、总黄酮含量以及抗氧化活性均呈下降趋势。其中总酚含量从消化前的 3.30 mg/mL 降至消化后的 0.62 mg/mL, 降低了 81.21%; 总黄酮含量从 2.88 mg/mL 降至 0.22 mg/mL, 降低了 99.31%; 核桃花提取物清除 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值从 211.02 μg/mL 上升到 424.45 μg/mL, 清除 ABTS 自由基的 IC₅₀ 值从 220.63 μg/mL 上升至 421.82 μg/mL, 铁还原能力从 106.13 μg/mL 下降为 40.47 μg/mL。在模拟胃消化和小肠消化阶段, 酸碱环境和消化酶的作用破坏了核桃花提取物中的抗氧化成分, 使其抗氧化活性发生了显著下降。

关键词: 核桃花; 体外模拟消化; 总酚; 总黄酮; 抗氧化能力

文章编号: 1673-9078(2020)11-196-201

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.11.0443

Changes of *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion on the Antioxidant Activity of Walnut Flower

LI Ru-rui¹, CHEN Xin¹, RU Yue-rong¹, MU Hong-lei², GAO Hai-yang², WANG Zhen-xing¹, KAN Huan¹

(1. Forest Food Research Institute/College of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

(2. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Food Science Institute /Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China)

Abstract: To investigate the influence of *in vitro* digestion on the antioxidant component and activity of walnut flower, the walnut flower extract (WFE) was subjected to mimic mouth, gastric and gastrointestinal digestion. The total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC) of WFE were determined by folin-ciocalteu method and sodium nitrite- aluminum nitrate colorimetric method. Antioxidant activities of WFE were evaluated using DPPH radical scavenging capacity, ABTS radical scavenging capacity, and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays. Results showed that TPC, TFC and antioxidant activity of WFE decreased during oral, gastric and intestinal digestion. After digestion, TPC decreased by 81.21% (from 3.30 to 0.62 mg/mL), while TFC decreased by 99.31% (from 2.88 to 0.22 mg/mL). The simulated digestion significantly decreased the antioxidant activity of WFE, the IC₅₀ value increased from 211.02 to 424.45 μg/mL for DPPH radical scavenging activity, from 220.63 to 421.82 μg/mL for ABTS radical scavenging activity, and from 106.13 to 40.47 μg/mL for FRAP value. In the stage of

引文格式:

李如蕊,陈欣,茹月蓉,等.体外模拟消化过程中核桃花提取物抗氧化活性的变化[J].现代食品科技,2020,36(11):196-201

LI Ru-rui, CHEN Xin, RU Yue-rong, et al. Changes of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the antioxidant activity of walnut flower [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(11): 196-201

收稿日期: 2020-05-11

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (2018ZG004); 农业农村部果品产后处理重点实验室开放基金 (GPCH201806); 云南省农业基础研究联合专项青年项目 (2017FG001 (-078)); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2016ZZX150)

作者简介: 李如蕊 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 林产食品加工

通讯作者: 王振兴 (1984-), 男, 助理研究员, 研究方向: 林产品加工。共同通讯作者: 阚欢 (1965-), 女, 教授, 研究方向: 农林产品开发与利用

gastric and intestinal digestion, the acid and alkali environment and digestive enzymes destroyed the antioxidant components of WFE, which led to a significant reduction in the antioxidant activity.

Key words: walnut flower; *in vitro* simulated digestion; total phenolic; total flavonoids; antioxidant activity

核桃花为胡桃科胡桃属植物核桃的雄花絮^[1], 是核桃主要副产物, 含有丰富的膳食纤维、蛋白质、矿物质及维生素等成分, 是一种优良的自然营养食品资源^[2-4]。我国民间有食用核桃花的传统, 但目前对其开发程度不够, 导致绝大部分核桃花被浪费。

研究发现核桃花含有多酚、黄酮等活性成分^[5], 具有抗氧化、抗菌、抗癌、降血糖、降血脂等功能活性, 如 Yi Ge Zhang 等^[6]对核桃果实、核桃薄膜、鲜核桃花中提取的酚类化合物进行比较, Muzaffer 等^[7]研究雄性胡桃花的体外消化模拟和抗菌活动过程, Karimzadeh K 等^[8]发现核桃雄花提取物对糖尿病大鼠有降血脂作用。但对这些成分和活性在生理消化过程中的动态变化尚不清楚。

体外模拟消化是一种模拟人体消化道中生理条件的仿生研究^[9], 尽管不能完全准确地反映样品在人体消化系统中的变化情况, 但是其具有简单、经济、实用以及不受道德伦理所束缚等优点, 因此被广泛用于研究食品的消化或吸收^[10], 如李贻等^[11]研究了体外模拟胃肠道消化条件下刺梨抗氧化成分的释放, 陈希苗等^[12]研究在体外模拟胃肠消化中山楂多酚及抗氧化活性的变化, HUIX 等^[13]模拟胃肠道消化对卤化蛋清凝胶的理化性质、凝胶结构的变化等。因此, 本论文建立体外模拟消化模型, 研究消化过程中核桃花的多酚、黄酮及其抗氧化活性的变化, 为核桃花的利用和开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

核桃花, 购于云南楚雄大姚县。

1.1.2 试剂

纤维素酶、果胶酶购于西亚化学工业有限公司; α -淀粉酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)、二铵盐 [2,2'-Azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic Acid) Ammonium Salt, ABTS] 购于 Sigma-Aldrich 公司; 芦丁、没食子酸购于上海源叶生物科技有限公司; 2,4,6-三(2-吡啶基)三嗪(2,4,6-Tri(2-pyridyl)-striazien, TPTZ)、冰醋酸、醋酸钠、HCl、NaOH、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、

FeSO_4 、维生素 C (Vitamin C, Vc)、二丁基羟基甲苯 (butylated hydroxy toluene, BHT)、过硫酸钾、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 、 NaNO_2 、 Na_2CO_3 、 $\text{MgCl}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_6$ 、KCl、 KH_2PO_4 、 NaHCO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、猪胆盐、甲醇等均作为分析纯。

1.1.3 仪器与设备

FA1104N 电子分析天平, 上海丙林电子科技有限公司; YB-250A 高速多功能粉碎机, 永康市速锋工贸有限公司; HH-2 型数显恒温水浴锅, 常州国华电器有限公司; SHB-III 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; RE-52 系列旋转蒸发仪, 上海亚荣生化仪器厂; DGH-9140A 数显电热鼓风干燥箱, 海一恒科学仪器有限公司; SG5200HDT 型超声波清洗器, 上海冠特超声仪器有限公司; LGJ-1D-80 冷冻干燥机, 北京亚泰科隆仪器技术有限公司; YXFT3MP 型 pH 计, 梅特勒-托利多精密仪器有限公司; F50 型酶标仪, Tecan; THZ-82A 数显恒温振荡器, 常州朗越仪器制造有限公司等。

1.2 试验方法

1.2.1 核桃花粗提物的制备

粉碎后的核桃花 100 g, 加入 600 mL 蒸馏水, 调节 pH 为 5, 加入 0.06 g 酶活力为 50 U/mg 的纤维素酶和 0.02 g 酶活力为 10 万 U/g 的果胶酶, 在超声波功率 400 W 和温度 50 °C 的条件下酶解 1 h。酶解完毕后加入 1400 mL 甲醇, 在同样的超声条件下提取 1 h。超声后过滤, 滤渣再加入 2000 mL 体积分数为 70% 的甲醇溶液, 在同样条件下提取一次。合并两次滤液, 在 50 °C 下旋蒸, 用 70% 的甲醇溶液定容到 100 mL, 此为核桃花粗提物 (Walnut flower extract, WFE)。

1.2.2 体外模拟消化

1.2.2.1 口腔消化

参照文献^[14]并稍作改进。模拟唾液的配置: 模拟唾液中含 15.1 mL KCl 溶液 (0.5 mol/L), 3.7 mL KH_2PO_4 溶液 (0.5 mol/L), 6.8 mL NaHCO_3 溶液 (1 mol/L), 0.5 mL $\text{MgCl}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_6$ 溶液 (0.15 mol/L) 和 0.16 mL $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液 (0.5 mol/L), 用去离子水补足至 400 mL, 然后用 6 mol/L HCl 溶液将 pH 调节至 7.0, 加入约 200 U/L 的 α -淀粉酶溶液。

取 50 mL WFE 加入 5 mL 模拟唾液, 避光充分混合, 在 37±2 °C 下以 95 r/min 的速度振荡 10 min。口腔

消化后,取出 5 mL 试样并在-20 °C 储存待测,剩余样品做下一步胃消化。

1.2.2.2 胃消化

参考文献^[15]并稍作改进。向混合物中加入 13 mg 胃蛋白酶,并用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液将样品 pH 调节为 2,将该混合物在 37±2 °C 下以 95 r/min 的速度振荡 2 h。模拟胃消化后,立即在冰浴中冷却混合物,取出 5 mL 试样并储存在-20 °C,将剩余的样品进行小肠消化。

1.2.2.3 肠消化

参考文献^[16]并稍作改进。在 15 cm 的纤维素透析膜中填充 0.9% 的 5.5 mL NaCl 溶液和 0.5 mol/L 的 5.5 mL NaHCO₃ 溶液。将胃消化物分成 25 mL 放入 50 mL 聚乙烯管中,将透析膜完全浸入,pH 调节为 5.0,加入 5 mL 胰酶-胆汁溶液(0.1 g 胰蛋白酶和 0.625 g)胆盐溶解于(0.5 mol/L),在 37±2 °C,以 95 r/min 的速度振荡 2 h。消化结束后取出透析袋,外表用蒸馏水冲洗,分别收集透析袋内样品(肠道透析样品)和透析袋外的样品(肠道残留样品),并储存在-20 °C 待测。

1.2.3 抗氧化成分分析

1.2.3.1 总酚含量测定

采用福林酚法测定总酚含量^[17]。取 50 μL 合适浓度的样品于 96 孔酶标板上,加入 125 μL 的 Folin-Ciocalteu 试剂,100 μL 质量浓度为 7.5% 的 Na₂CO₃ 溶液,避光反应 30 min 后,然后于 620 nm 测吸光值,同时用蒸馏水代替 Na₂CO₃ 做空白。分别以质量浓度为 10、20、40、60、80、100 和 120 μg/mL 的没食子酸标准溶液代替样品进行反应,以吸光值为纵坐标,没食子酸质量浓度为横坐标,绘制标准曲线,根据标准曲线计算样品中总酚含量。

1.2.3.2 总黄酮含量测定

采用亚硝酸钠-硝酸铝法测定总黄酮含量^[18]。取 40 μL 不同浓度的芦丁标准液或样品液于 96 孔酶标板上,加入 20 μL NaNO₂ (3%, *m/V*), 20 μL Al(NO₃)₃ (6%, *m/V*), 140 μL 的 NaOH (4%, *m/V*) 和 60 μL 70% 的甲醇,室温反应 16 min 后,于 510 nm 处测吸光值。分别以质量浓度为 0、40、80、120、160 和 200 μg/mL 的芦丁标准液代替样品进行反应,以吸光值为纵坐标,芦丁质量浓度为横坐标,绘制标准曲线,根据标准曲线计算样品中总黄酮含量。

1.2.4 抗氧化活性

1.2.4.1 清除 DPPH 自由基的能力测定

参考文献^[19]并做适当修改。取 50 μL 适宜浓度的样品与 100 μL DPPH·溶液于 96 孔酶标板上混合,暗处反应 30 min,于 492 nm 测吸光值(A_n)。以 70% 甲

醇溶液代替样品的反应体系为空白组(A_c),以甲醇代替 DPPH·的反应体系为样品控制组(A_b)。计算 DPPH 自由基清除率 IC₅₀ 值。其值越小表明样品抗氧化能力越强。DPPH 自由基清除率的计算公式为:

$$\text{清除率} = [(A_c - A_n + A_b) / A_c] * 100\% \quad (1)$$

式中: A_n 为实验样品的光吸收值; A_b 为样品控制组的光吸收值; A_c 为空白组的光吸收值。

1.2.4.2 清除 ABTS 自由基的能力测定

参考文献^[19]并做适当修改。取 50 μL 适宜浓度的样品于 96 孔酶标板中,加入 200 μL ABTS 溶液,室温反应 5 min 后于 405 nm 测反应后溶液吸光值(A_n),以甲醇代替 ABTS 溶液为样品空白(A_b),甲醇代替样品为控制组(A_c),ABTS 自由基清除率的计算参考公式(1)。

1.2.4.3 总抗氧化能力测定

亚铁还原能力(Ferric reducing antioxidant power, FRAP)的测定^[10]:取 50 μL 适宜浓度的样品于 96 孔酶标板中,加入 200 μL FRAP 工作液,37 °C 反应 10 min,于波长 620 nm 处测定吸光值,平行 3 次。

FeSO₄ 标准曲线的绘制:取 50 μL 的 FeSO₄ 溶液于 96 孔酶标板中,加入 200 μL FRAP 工作液,37 °C 反应 10 min,于波长 620 nm 处测定吸光值,平行 3 次。以吸光度为纵坐标,FeSO₄ 标准品浓度为横坐标,根据 FeSO₄ 标准曲线,计算相同吸光值下,核桃花样品的 FRAP 值用 FeSO₄ 当量表示,即为每克样品相当于 FeSO₄ 的质量(μg)。

1.2.5 数据处理

采用软件 SPASS 22.0 和 Origin 9.0 软件进行数据分析。所有试验均重复 3 次,结果以(平均值±标准偏差)表示。

2 结果与讨论

2.1 总酚含量的测定

福林酚试剂中的钨钼酸可以和多酚化合物反应生成蓝色化合物,在 620 nm 处有最大吸收值,其颜色深浅和多酚含量成正比^[20]。WFE 在消化过程中的总酚含量变化见图 1。

由图 1 可以看出,WFE 中总酚的含量随消化过程进行而下降,口腔消化对 WFE 总酚含量无显著性影响,胃、肠消化均显著降低了 WFE 中总酚含量(*p*<0.05),肠道透析样品和肠道残留样品无显著差异。未消化样品中总酚含量为 3.30 mg/mL,经过口腔消化后为 3.00 mg/mL,经过胃消化后为 2.40 mg/mL,下降了 27.27%。在肠消化阶段,有 18.00% 的酚类物

质被小肠吸收,相比下降了 81.21%。结果表明,酚类物质更多的是在胃和肠道被消化吸收。

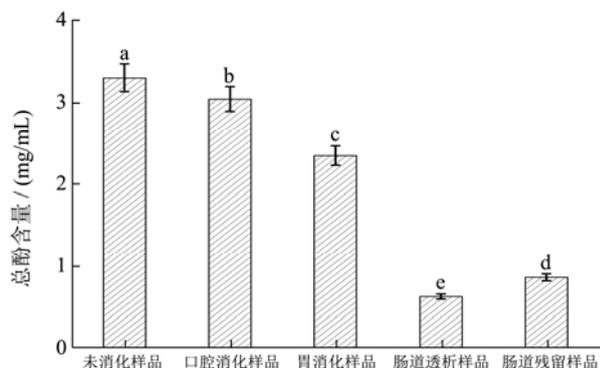


图 1 消化过程中样品总酚含量变化

Fig.1 Changes of total phenolic content during *in vitro* simulated digestion

注: 不同的小写字母表示 WFE 的消化样品间差异显著 ($p<0.05$)。下图同。

2.2 总黄酮含量的测定

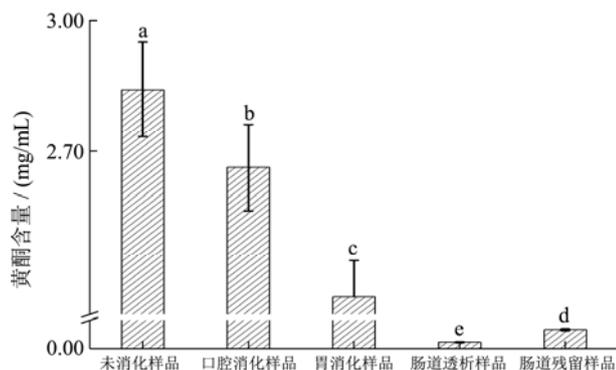


图 2 消化过程中样品黄酮含量变化

Fig.2 Changes of total flavonoid content during *in vitro* simulated digestion

由图 2 可以看出,经过体外模拟消化后,WFE 中的黄酮含量逐渐呈下降趋势,口腔消化对 WFE 总酚含量无显著性影响。未消化样品中黄酮含量为 2.88 mg/mL,口腔消化后,WFE 中黄酮含量无显著性变化,为 2.65 mg/mL。经过肠道消化吸收后黄酮含量变化显著 ($p<0.05$),为 0.06 mg/mL,下降了 97.91%。由此可见经过肠道消化后黄酮损失较大。

2.3 铁还原能力的测定

由图 3 可以看出,WFE 在依次经过口腔消化、胃消化、小肠消化、小肠吸收后其 FRAP 值逐渐下降,依次为 106.13、101.36、81.60、37.74、40.47 $\mu\text{mol Trolox/mg}$ 。相比未消化的样品,最终下降了 61.65%,结果表明,WFE 的 FRAP 值随着肠消化时间延长显著下降。

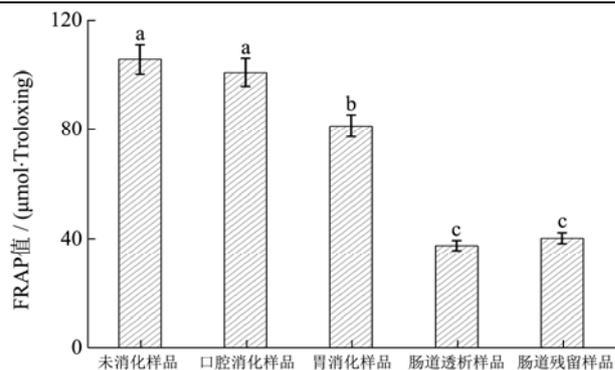


图 3 消化过程中样品 FRAP 值含量变化

Fig.3 Changes of FRAP values during *in vitro* simulated digestion

口腔消化液中 α 淀粉酶作用位点单一,且中性的 pH 条件对酚类物质影响较小,所以口腔消化对 WFE 抗氧化活性影响较小。胃作为人体主要的消化器官,胃蛋白酶的作用以及低酸性条件对抗氧化活性成分有较大影响^[14,16]。肠道消化后,其还原铁的能力进一步降低,可能与肠消化阶段多酚浓度低和 pH 值有关^[21]。

2.4 DPPH 自由基清除能力

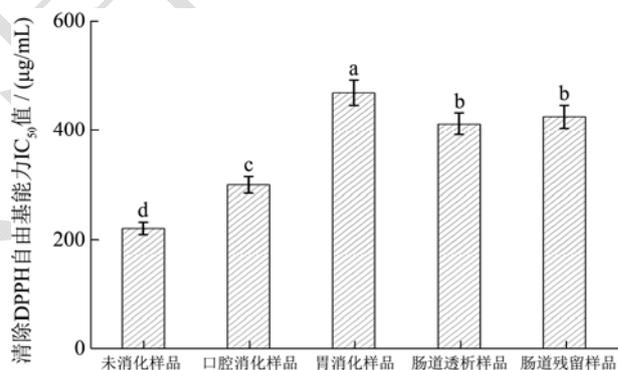


图 4 消化过程中 DPPH 自由基清除能力的变化

Fig.4 Changes of DPPH radical scavenging capacity during *in vitro* simulated digestion

由图 4 可知,WFE 的 DPPH 自由基清除能力逐渐下降,其值依次为 221.02、299.25、411.15、424.45、468.48 $\mu\text{g/mL}$ 。最终消化后相比未消化样品提高了 52.82%。其中胃消化阶段显著降低 ($p<0.05$),可能是胃消化液的强酸性环境,促使反应体系中的多酚类物质发生降解或转化^[22]。胃消化过后,肠道吸收液和肠道消化液相比胃消化液,其 DPPH 自由基清除能力有所上升,可能是肠道消化液中消化酶的作用,使得 WFE 中活性物质被水解而产生具有清除自由基能力的羟基化合物所导致^[21]。

2.5 ABTS 自由基清除能力

由图 5 可以看出,ABTS 自由基清除能力变化趋

势呈先下降后上升,与 DPPH 自由基相似,与 Wu^[18] 等的报道一致。依次为 220.63、299.25、471.26、412.50、421.82 μg/mL。胃消化后显著降低 ($p<0.05$),说明经过胃消化后 WFE 中的活性成分被降解,导致其抗氧化能力逐渐降低。

WFE 依次经过模拟口腔消化、胃消化后其清除 ABTS 自由基的能力显著降低,经过肠道消化后,其清除自由基的能力有所升高,可能是在低酸性环境中核桃花中活性物质的抗氧化能力受到抑制,当恢复到适当 pH 条件时,小肠消化液的清除 ABTS 自由基的能力有所上升^[23,24]。

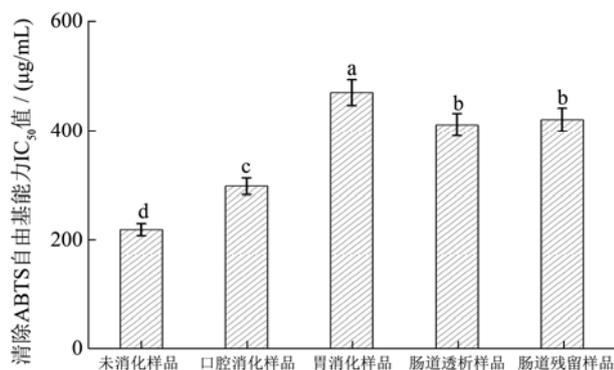


图5 消化过程中 ABTS 自由基清除能力的变化

Fig.5 Changes of ABTS radical scavenging capacity during *in vitro* simulated digestion

2.6 相关性分析

利用 SPSS 22.0 软件对 WFE 中活性物质含量与各抗氧化能力进行相关性分析,分析结果见表 1。从表 1 可以看出在体外模拟消化过程中总酚、总黄酮含量与 DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力之间的效果系数在-0.59 到-0.7 之间,而铁还原能力与总酚含量、总黄酮含量之间具有极其显著的相关性 ($R^2=0.99, p<0.01$)。

表 1 相关性分析

Table 1 The correlational analyses

指标	总酚	总黄酮	DPPH	ABTS	FRAP
总酚	1.00	0.99**			
总黄酮		1.00			
DPPH	-0.70	-0.61	1.00	1.00**	-0.71
ABTS	-0.69	-0.59		1.00	-0.69
FRAP	0.99**	0.99**			1.00

注: **为极显著 ($p<0.01$)。

3 结论

本实验首次通过体外模拟消化的方法,探讨核桃花活性物质在口腔、胃肠消化过程中总酚含量、总黄

酮含量的变化规律,以铁还原能力和 DPPH、ABTS 自由基清除能力为指标考察其抗氧化活性的变化情况。实验结果如下:消化过程中的核桃花活性物质及抗氧化活性显著下降:其总酚含量在胃、肠消化均显著降低 ($p<0.05$),为 0.62 ± 0.03 mg/mL,相比未消化样品下降了 81.21%;总黄酮含量经过肠道消化吸收后含量变化显著 ($p<0.05$),为 0.06 ± 0.01 mg/mL,下降了 97.91%;相比未消化的样品,FRAP 值最终下降了 61.65%,结果表明,核桃花的 FRAP 值随着肠消化时间延长显著下降;DPPH·、ABTS 自由基清除能力在胃消化阶段显著降低 ($p<0.05$),说明经过胃肠消化后核桃花中的活性成分被降解,导致其抗氧化能力逐渐降低。相关性分析表明,在体外模拟消化过程中,黄酮和总酚的含量与 DPPH·、ABTS 自由基清除能力和铁还原能力呈现显著相关。论文结果可以为评价核桃花开发利用提供理论依据。下一步拟利用细胞模型和动物模型来对核桃花中具体活性成分进行定量追踪,以研究其吸收情况。

参考文献

[1] 王丹.核桃花粉化学和营养成分提取及抗氧化活性研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2014
WANG Dan. The chemistry and nutrient extraction and anti-oxidation activity of walnut stamina flowers [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2014

[2] 李傲,王谢祗,翟宇鑫,等多酚化合物体外模拟消化的稳定性分析[J].食品科学,2016,37(13):1-5
LI Chu, WANG Xie-yi, ZHAI Yu-xin, et al. Stability of polyphenols during *in vitro* digestion [J]. Food Science, 2016, 37(13): 1-5

[3] 韩本勇,任英.核桃花的开发利用研究[J].民营科技,2014,8: 240
HANG Ben-yong, REN Ying. The development and utilization of walnut flower research [J]. Private Science and Technology, 2014, 8: 240

[4] 陈朝银,赵声兰,曹建新,等.核桃花营养成分的分析[J].中国野生植物资源,1999,2:45-47
CHEN Chao-yin, ZHAO Sheng-lan, CAO Jian-xin, et al. Walnut flower nutrition analysis [J]. China's Wild Plant Resources, 1999, 2: 45-47

[5] 杨葵华,吕瑞.核桃花的枝干、花朵中 Fe、Mn、Zn 含量的比较[J].食品研究与开发,2016,37(1):161-163
YANG Kui-hua, LYU Rui. Walnut flower branches, flowers in the comparison of Fe, Mn, Zn content [J]. Food Research and Development, 2016,37(1): 161-163

- [6] ZHANG Yi-ge, KAN Huan, Kiran Thakur, 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(15): 126672
- [7] Muzaffer, Paul. Phytochemical analysis, *in vitro* antioxidant and antimicrobial activities of male flower of *Juglans regia* L [J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 345-356
- [8] Karimzadeh K, Hosseini E, Kavooosi E, et al. Hypolipidemic effects of hydroalcoholic extract from walnut male flowers on diabetic rats [J]. *Armaghane Danesh Bimonthly Journal*, 2013, 18(6): 484-694
- [9] YE Ai-qian, WANG Xin, LIN Quan-quan, et al. Dynamic gastric stability and *in vitro* lipid digestion of whey-protein-stabilised emulsions: Effect of heat treatment [J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126463
- [10] 翟宇鑫. 体外模拟消化条件下南酸枣中酚类化合物抗氧化性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015
- ZAHY Yu-xin. Under the condition of *in vitro* digestion south of phenolic compounds in *zizyphus jujube* research of oxidation resistance [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015
- [11] 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
- LI Yi, HE Jun, ZHANG Peng-min, et al. Antioxidant components release of *Rosa roxburghii* Tratt by *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(2): 102-107
- [12] 陈希苗, 李美英, 许秋莉, 等. 体外模拟胃肠消化中山楂多酚及抗氧化活性的变化[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 31-37
- CHEN Xi-miao, LI Mei-ying, XU Qiu li, et al. Changes in polyphenol contents and antioxidant activity in hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bunge) during simulated gastrointestinal digestion [J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 31-37
- [13] HUI X, YONG G T, MENG X, et al. Changes in physicochemical properties, gel structure and *in vitro* digestion of marinated egg white gel during braising [J]. *Food Chemistry*, 2020, 330(15): 127321
- [14] Duda-chodak A, Sroka P, Satora P, et al. Transformations of phenolic compounds in an *in vitro* model simulating the human alimentary tract [J]. *University of Zagreb*, 2009, 47(4): 456-463
- [15] YUAN Yi-qiong, LI Chuan, ZHENG Qian-wen, et al. Effect of simulated gastrointestinal digestion *in vitro* on the antioxidant activity, molecular weight and microstructure of polysaccharides from a tropical sea cucumber (*Holothuria leucospilota*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 735-741
- [16] Cruz R, Mendes E, Maulvault A L, et al. Bioaccessibility of polybrominated diphenyl ethers and their methoxylated metabolites in cooked seafood after using a multi-compartment *in vitro* digestion model [J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126462
- [17] 高畅, 程大海, 高欣, 等. 蓝莓果渣提取物总酚含量及抗氧化活性研究[J]. 植物研究, 2010, 30(2): 253-256
- GAO Chan, CHENG Da-hai, GAO Xin, et al. Total phenolic content and antioxidant activities of blueberry pomace extracts [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(2): 253-256
- [18] WU Peng, CHEN Xiao-dong. On designing biomimic *in vitro* human and animal digestion track models: ideas, current and future devices [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 35: 10-19
- [19] 来吉祥. 黑豆萌芽水提物抗氧化活性研究及其机理初探[D]. 无锡: 江南大学, 2014
- LAI Ji-xiang. Black bean sprout water extraction of antioxidant activity research and its mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014
- [20] 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]. 广州: 华南理工大学, 2013
- XIONG Yun-xia. Study of the effect of *in vitro* digestion on antioxidant activity and anti-proliferative activity of apple and pear [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013
- [21] 彭梦雪, 从彦丽, 刘冬. 模拟胃肠消化评价苹果多酚、黄酮及抗氧化活性的相关性[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 122-128
- PENG Meng-xue, CONG Yan -li, LIU Dong. Determination of antioxidant activity and the contents of polyphenols and flavonoids of apples by simulated gastrointestinal digestion [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(1): 122-128

(下转第 169 页)