

体外模拟胃肠道消化下刺梨抗氧化成分的释放

李贻, 贺君, 张鹏敏

(烟台大学生命科学学院, 山东烟台 264005)

摘要: 通过体外模拟胃肠消化来研究贵州刺梨多酚、黄酮及抗氧化活性的变化规律, 探讨其对刺梨抗氧化成分及其活性的影响。对刺梨进行体外模拟胃消化和体外模拟肠消化, 分别使用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3$ 比色法、福林-酚比色法以及 DPPH 自由基清除率与普鲁士蓝法测还原力来测定贵州刺梨在体外模拟胃肠消化中多酚、黄酮含量和抗氧化活性的变化。实验结果显示, 相较于空白实验, 贵州刺梨在模拟胃消化中多酚、黄酮含量、DPPH 自由基清除率以及还原力数值都有明显上升的趋势, 模拟胃消化组 0.5 h 内有明显上升的趋势, 最大分别增加 1.48、1.35、1.14、1.48 倍, 之后趋于平稳。胃酸对照组最大分别增加 1.28、1.21、1.07、1.41 倍, 之后趋于平稳, 模拟肠消化组 1 h 内有明显上升的趋势, 最大分别增加 1.07、1.65、1.28、1.07 倍, 之后趋于平稳。研究结果表明胃蛋白酶、胃酸、胆盐以及胰酶能促进贵州刺梨中抗氧化成分的释放及其活性的增加。

关键词: 刺梨; 体外模拟; 多酚; 黄酮; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2020)02-102-107

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.2.015

Antioxidant Components Release of *Rosa roxburghii* Tratt by *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion

LI Yi, HE Jun, ZHANG Peng-min

(School of Life Science, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The changes in contents of polyphenols, flavonoids and their antioxidant activities in Guizhou *Rosa Roxburghii* Tratt were studied by *in vitro* simulated gastrointestinal digestion to investigate the relationship between antioxidant components and antioxidant activity of *Rosa Roxburghii* Tratt. *In vitro* simulated gastric digestion and *in vitro* simulated intestinal digestion were performed. $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3$ colorimetric method, forin-phenol colorimetric method were used to detect the content of polyphenols, flavonoids. DPPH free radical scavenging rate and Prussian blue method were used to detect the antioxidant activities. The results showed that compared with the control, the content of polyphenols and flavonoids, DPPH free radical scavenging rate and reducing power of Guizhou *Rosa Roxburghii* Tratt increased significantly during simulated gastric digestion. The simulated gastric digestive group showed a significant increase within 0.5 h, and kept constantly during last stage. The content of polyphenols and flavonoids, DPPH free radical scavenging rate and reducing power increased by 1.48, 1.35, 1.14, and 1.48 times, respectively. That in the gastric acid control group increased by 1.28, 1.21, 1.07, and 1.41 times, respectively. The simulated intestinal digestion group showed a significant upward trend within 1 h and kept constantly during last stage. The content of polyphenols and flavonoids, DPPH free radical scavenging rate and reducing power increased by 1.07, 1.65, 1.28, and 1.07 times, respectively. The results showed that pepsin, gastric acid, bile salts and pancreatic enzyme could promote the release of antioxidant compounds and increase the antioxidant activity of Guizhou *Rosa Roxburghii* Tratt.

Key words: *Rosa roxburghii* Tratt; *in vitro* simulation; polyphenols; flavonoids; antioxidant

刺梨 (*Rosa roxburghii* Tratt) 为蔷薇科植物, 又名送春归、野生果, 是一种稀有的滋补健身的营养珍果, 主要生长在贵州、川南、湘西等地, 刺梨果实中含有维生素 C、多酚、有机酸、多糖、黄酮等多种抗氧化活性物质^[1,2]。现代医学研究表明, 刺梨具有调节机体

免疫功能、延缓衰老、抗动脉硬化、抗肿瘤等多种生物学作用^[3]。

传统刺梨抗氧化成分研究主要通过化学提取法来测定其果实中多酚、黄酮、维生素C等抗氧化活性物质^[4], 该方法通常只能检测出刺梨果实中抗氧化成分含量, 并不能真实反映出刺梨在胃肠消化过程抗氧化活性物质含量的变化^[5]。体外模拟胃肠消化系统是一种基于人体生理消化机能来模拟食物在胃肠中消化的生物学研究, 常用来代替动物活体模拟胃肠消化实验, 同

收稿日期: 2019-09-04

作者简介: 李贻 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品微量元素检测
通讯作者: 贺君 (1963-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 海洋生物活性物质

时不受道德伦理的约束,是一种经济、安全、快捷且操作可重复性强的新型生物研究方法^[6]。现已有学者开始研究体外模拟胃肠消化,例如胡义东^[7]等研究了芒果在体外模拟胃肠消化中抗氧化及其活性的变化。陈希苗^[8]等在体外模拟胃肠消化中山楂多酚及抗氧化活性的变化等。

目前国内有关刺梨体外模拟胃肠消化的研究鲜有报道,对刺梨在消化过程中抗氧化成分及其活性的变化了解较少^[9]。本实验探究贵州刺梨在体外模拟胃肠消化中多酚、黄酮及抗氧化活性的变化规律,为刺梨新功能食品开发提供思路,完善刺梨营养与健康评价体系,同时也为刺梨体外模拟胃肠消化提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验所用刺梨采购自贵州镇远,属于新鲜刺梨,实验室零下20℃冰箱里冻藏。

胃蛋白酶(猪胃黏膜)USP级1:3000,酶活力3000 U/mg,胰蛋白酶(猪胰)BR 1:250,酶活力250 U/mg,猪胆盐(胆酸含量≥60%),上海源叶生物科技有限公司。

焦性没食子酸,生工生物工程(上海)股份有限公司;芦丁,生工生物工程(上海)股份有限公司;盐酸(HCl),重庆国泰康宁制药有限责任公司;Folin-酚试剂,上海华蓝化学科技有限公司;1,1-二苯基苦基苯肼(DPPH),TCI公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

I3紫外可见分光光度计,济南海能仪器股份有限公司;JYL-Y5九阳高速破壁调理机,上海电子商务有限公司;PHS-3C酸度计,上海卓精电子电科技有限公司;HA-B水浴恒温振荡器,天津市泰斯特仪器有限公司;101-2电热鼓风干燥箱,常州澳华仪器有限公司;FA2004电子分析天平,上海越平科学仪器有限公司;TGL-16C高速离心机,湖南湘立科学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 体外模拟胃肠消化实验

1.3.1.1 体外模拟胃消化

参照从彦丽等^[10]研究柑橘体外模拟胃肠消化方法并改进,进行刺梨模拟胃消化实验,称取30.6 g刺梨果肉,与90 mL 0.9 g/100 mL的NaCl溶液混合,经组织捣碎机捣碎3 min,制成匀浆液,过滤后用NaCl

溶液定容到100 mL容量瓶。设立3个实验平行组,模拟胃消化组:30 mL匀浆液水浴至37℃后,加入3 mL模拟胃液(0.1 g胃蛋白酶溶于3 mL水),1 mol/L HCl溶液调节pH为2.0。胃酸对照组:30 mL匀浆液加入1 mol/L HCl溶液在37℃温度条件下调节pH为2.0。空白对照组:30 mL匀浆液pH值为刺梨原始匀浆液的pH值。分别装入已编号的锥形瓶,避光冲入氮气后在37℃、105 r/min的避光恒温水浴摇床震荡消化,于消化的0、0.5、1.0、2.0、3.0 h取上清液,1500 r/min离心5 min后,取上清液进行测定。

1.3.1.2 体外模拟肠消化

参照从彦丽等^[10]研究柑橘体外模拟胃肠消化方法并改进,进行刺梨模拟肠消化实验,基于模拟胃消化的数据结果分析,模拟胃消化1.0 h后,样品的多酚黄酮释放量趋于稳定,因此刺梨胃消化1.0 h后作为肠消化0 h开始。实验设立2个平行组,模拟肠消化组:30 mL刺梨匀浆液经过模拟胃消化1.0 h后,加入3 mL模拟肠液(0.1 g胰酶和1.0 g胆汁溶于3 mL 0.1 mol/L pH 7.0的NaHCO₃-Na₂CO₃缓冲溶液),1 mol/L NaHCO₃溶液调节pH值至7.0,肠空白对照组:30 mL刺梨匀浆液经过模拟胃消化1.0 h后,加入3 mL的0.1 mol/L pH 7.0的NaHCO₃-Na₂CO₃缓冲溶液,1 mol/L NaHCO₃溶液调节pH值至7.0,分别装入已编号的锥形瓶,避光冲入氮气后继续在37℃、105 r/min的恒温水浴摇床震荡消化,于消化的0、0.5、1.0、2.0、3.0 h取上清液,1500 r/min离心5 min后,取上清液进行测定。

1.3.2 多酚含量测定

参照Musci M^[11]用福林-酚试剂比色法对普洱茶中多酚含量测定方法并改进,精确移取没食子酸标准溶液0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mL于25 mL玻璃试管中,分别加入5 mL 60%乙醇;1 mL福林-酚试剂;7.5%的Na₂CO₃溶液;最后再用60%乙醇定容到25 mL,摇匀,避光显色1 h。在765 nm波长处测定吸光度。多酚含量以每百克干样品中没食子酸当量表示(mg GAE/100 g)。

没食子酸标准曲线的线性方程: $y=0.07857x+0.37762$, $R^2=0.993$,可得知没食子酸溶液在浓度0~20 μg/mL范围内呈线性。

1.3.3 黄酮含量测定

参照Shi J Y^[12]检测银杏叶中黄酮含量实验方法,稍作修改精确移取芦丁标准溶液0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 mL于10 mL玻璃试管中,先加质量分数5%的NaNO₂溶液0.5 mL,摇匀,静置6 min;再加入质量分数10%的Al(NO₃)₃溶液0.5 mL,摇匀,静置6 min;最后加入4.0 mL 1 mol/L NaOH溶液,分别用质量分数为60%的

乙醇稀释至刻度, 摇匀, 静置20 min。在512 nm波长处测定吸光度。黄酮含量以每百克干样品中儿茶素当量表示 (mg Rutin/100 g)。

芦丁标准曲线的线性方程: $y=0.0118x+0.018$, $R^2=0.996$, 可得知芦丁溶液在浓度0~80 $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈线性关系。

1.3.4 抗氧化活性的测定

DPPH 自由基清除率参照毛立忠等^[13]测定刺梨在体外模拟胃肠消化中抗氧化活性。DPPH 溶液配制: 称取 20 mg DPPH 用 70%乙醇溶解并定容到 250 mL 容量瓶。

DPPH 自由基清除率 (%) = $[1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100$, DPPH 自由基清除率越大, 刺梨抗氧化活性越大。

式中: A_0 (2 mL 70%乙醇与 2 mL DPPH 溶液混合后, 在 517 nm 处测得其吸光度), A_1 (2 mL DPPH 与 2 mL 刺梨消化溶液 (稀释 100 倍) 混合后稀释 100 倍, 在 517 nm 处测得其吸光度), A_2 (2 mL 70%乙醇与 2 mL 刺梨消化溶液混合后, 刺梨溶液稀释 100 倍, 在 517 nm 处测得其吸光度)。

1.3.5 还原力的测定

普鲁士蓝法测刺梨在体外模拟胃肠消化中还原力, 用紫外分光光度计在波长 700 nm 处直接测定刺梨消化液吸光度值。待测液中还原力值越高, 其抗氧化活性越大^[14,15]。参照李粉玲等^[16]测定还原力方法并稍作修改, 取 1 mL 刺梨消化溶液稀释 10 倍, 用紫外分光光度计在 700 nm 处测得其吸光度值, 还原力大小可直接反映出物质抗氧化活性的大小, 还原力值越大抗氧化活性也就越高。

1.3.6 数据统计分析

刺梨前处理和体外模拟胃肠消化实验重复3次, 采用DPS 15.10对试验数据进行统计分析, 显著性水平为 ($p < 0.05$), 试验结果用 ($\bar{x} \pm s$) 表示。

2 结果与分析

2.1 体外模拟胃肠消化中多酚释放量的变化

图 1、图 2 为刺梨在体外模拟胃肠消化过程中多酚释放量的变化, 在模拟胃消化过程中, 相较于空白对照组, 模拟胃消化组和胃酸对照组进行消化时, 刺梨在 0.5 h 内多酚释放量明显上升并达到最大 ($p < 0.05$), 具有显著差异, 随后趋于稳定。0.5 h 模拟胃消化组多酚释放量为 196.05 mg GAE/100 g, 0.5 h 空白对照组多酚释放量为 132.10 mg GAE/100 g, 同比增长 1.48 倍。0.5 h 胃酸对照组多酚释放量 168.40 mg GAE/100 g, 增加 1.27 倍。在模拟肠消化过程中, 多酚释放量下降, 肠消化 0.5 h 后趋于稳定。相较于 1 h

空白对照组多酚释放量 88.32 mg GAE/100 g, 1 h 模拟肠消化组多酚释放量为 90.61 mg GAE/100 g, 两组之间无明显差异 ($p > 0.05$)。这与 Rajan^[17]等人研究结果一致, 由此说明胃蛋白酶、胃酸可促进刺梨多酚的释放。

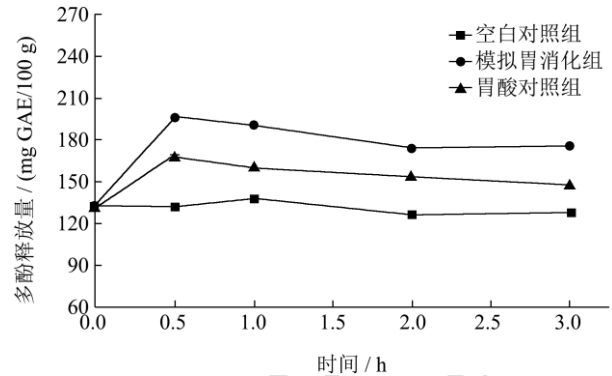


图 1 刺梨体外模拟胃消化过程中多酚释放量的变化

Fig.1 Change of polyphenols release during gastric digestion simulated by roxburgh rose in vitro

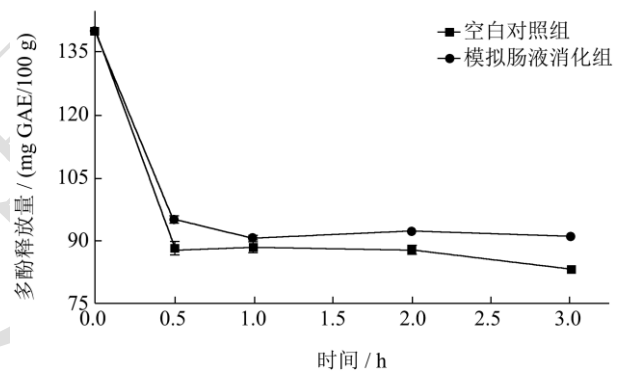


图 2 刺梨体外模拟肠消化过程中多酚释放量的变化

Fig.2 Changes of polyphenol release during intestinal digestion simulated by roxburgh rose in vitro

贵州刺梨多酚类物质主要在模拟胃消化过程中释放, 多酚释放量在模拟胃消化中总体增加, 模拟肠消化过程中多酚释放量总体降低。这可能与胃消化液 pH 值有关, 模拟胃的蠕动和较低的 pH 值可以降低刺梨果肉的粒径, 降低多酚类物质分子之间的相互作用力, 从而促进多酚的释放^[18]。模拟肠消化时, 可能与消化酶含量的减少、胆盐的消耗以及肠消化液 pH 值的增加等因素有关, 使得刺梨在模拟肠消化过程中多酚释放量下降。

2.2 体外模拟胃肠消化中黄酮释放量的变化

图 3、图 4 为刺梨在体外模拟胃肠消化过程中黄酮释放量的变化, 在模拟胃消化过程中, 相较于空白对照组, 模拟胃消化组和胃酸对照组进行消化时, 0.5 h 内黄酮释放量明显上升并达到最大 ($p < 0.05$), 具有显著差异, 随后趋于稳定。0.5 h 模拟胃消化黄酮释放

量为 96.61 mg Rutin/100 g, 0.5 h 空白对照组黄酮释放量为 71.82 mg Rutin/100 g, 同比增长 1.35 倍。胃酸对照组黄酮释放量为 86.58 mg Rutin/100 g, 增加 1.21 倍。在模拟肠消化过程中, 黄酮释放量下降 ($p < 0.05$), 具有显著差异, 0.5 h 后趋于稳定。相较于 1 h 空白对照组黄酮释放量 17.58 mg Rutin/100 g, 1 h 模拟肠消化组黄酮释放量为 29.02 mg Rutin/100 g, 最大增加 1.65 倍。与陆俊^[19]等人研究结果一致由此说明胃蛋白酶、胃酸、胆盐以及胰酶等可促进黄酮的释放。

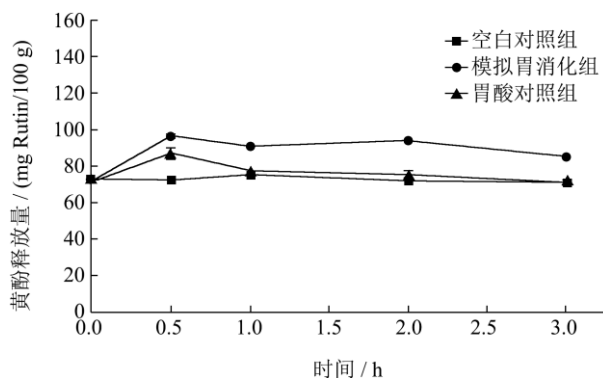


图3 刺梨体外模拟胃消化过程中黄酮释放量的变化

Fig.3 Changes of flavonoids release during gastric digestion simulated by roxburgh rose *in vitro*

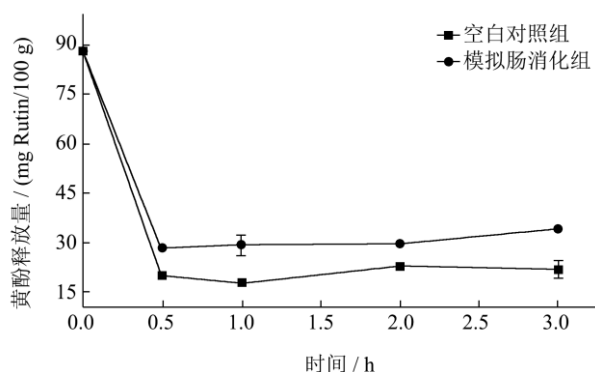


图4 刺梨体外模拟肠消化过程中黄酮释放量的变化

Fig.4 Changes of flavonoids release during intestinal digestion simulated by roxburgh rose *in vitro*

贵州刺梨黄酮类物质主要在模拟胃消化过程中释放, 黄酮释放量在模拟胃消化中总体增加。模拟肠消化过程中黄酮释放量总体降低, 但相较于空白对照组, 黄酮释放量仍有显著增加。模拟消化后黄酮释放量增加原因可能有: (1) 刺梨黄酮主要成分为杨梅素、槲皮素和山萜素, 在较低 pH 模拟胃消化环境中, 黄酮主要成分之间的基团作用力减弱, 从而促进黄酮的释放^[18]; (2) 蛋白质被胃蛋白酶或胰酶水解后, 与蛋白质共价和非共价结合的黄酮类物质可能被释放出来^[20]; (3) 在 37 °C 模拟胃肠消化液作用下, 刺梨中易水解的黄酮类物质发生水解, 因此黄酮类物质可能被释放出来。

2.3 体外模拟胃肠消化中 DPPH 自由基清除率的变化

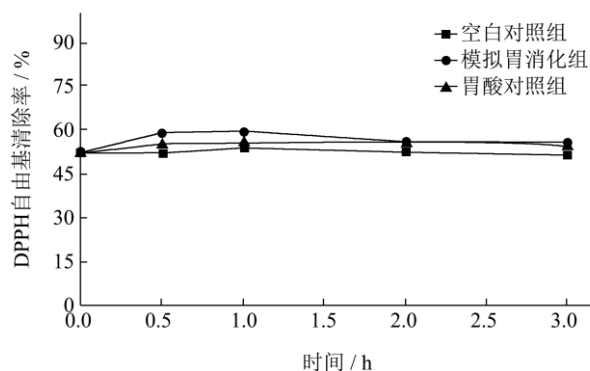


图5 刺梨在体外模拟胃消化中 DPPH 自由基清除率的变化

Fig.5 DPPH free radical clearance rate of roxburgh rose *in vitro* simulated gastric digestion

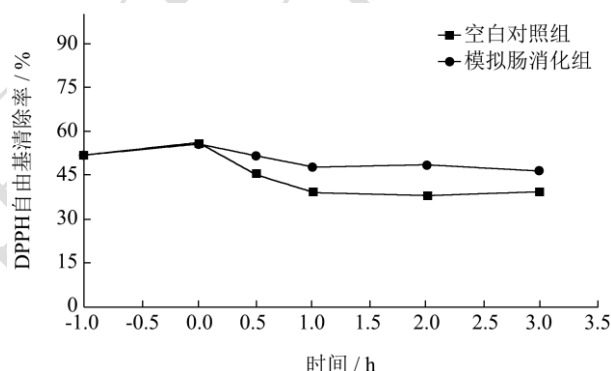


图6 刺梨在体外模拟肠消化中 DPPH 自由基清除率的变化

Fig.6 DPPH radical clearance rate of roxburgh rose *in vitro* simulated intestinal digestion

图 5、图 6 为刺梨在体外模拟胃肠消化过程中 DPPH 自由基清除率大小的变化, 在模拟胃消化过程中, 相较于空白对照组, 模拟胃消化组和胃酸对照组进行消化时, 0.5 h 内 DPPH 自由基清除率逐渐增加 ($p > 0.05$), 无明显差异, 0.5 h 模拟胃消化组 DPPH 自由基清除率为 59.07%, 0.5 h 空白对照组 DPPH 自由基清除率为 51.88%, 同比增长 1.14 倍。0.5 h 胃酸对照组 DPPH 自由基清除率为 55.68%, 增加 1.06 倍, 无显著增加趋势。可能与刺梨抗氧化成分的化学性质与结构有关, 还需要进一步的深入研究学习。在模拟肠消化过程中, DPPH 自由基清除率下降 ($p < 0.05$), 具有显著差异, 1 h 后趋于稳定。相较于 1 h 空白对照组 DPPH 自由基清除率 38.92%, 1 h 模拟肠消化组 DPPH 自由基清除率为 47.86%, 最大增加 1.28 倍。由此说明胆盐、胰酶可增加 DPPH 自由基清除率, 自由基清除率大小可反映刺梨抗氧化活性的大小, 由图可得胆盐、胰酶可增加刺梨抗氧化活性。

2.4 体外模拟胃肠消化中还原力的变化

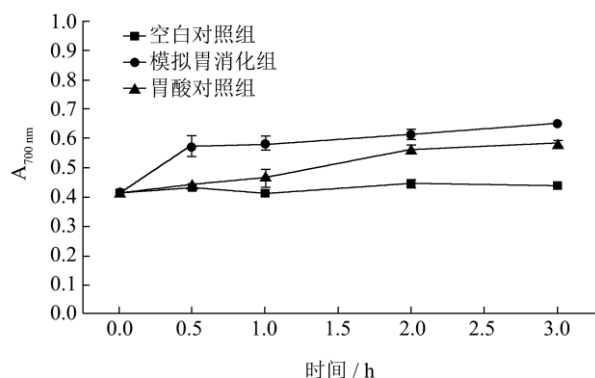


图7 刺梨在体外模拟胃消化中还原力的变化

Fig.7 Reduction force of roxburgh rose *in vitro* simulated gastric digestion

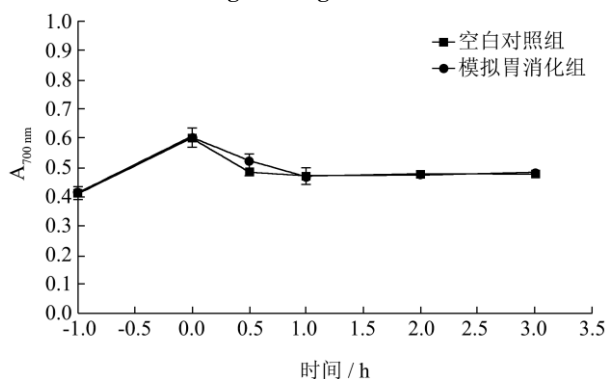


图8 刺梨在体外模拟肠消化中还原力的变化

Fig.8 Reduction force of roxburgh rose *in vitro* simulated intestinal digestion

图7、图8为刺梨在体外模拟胃肠消化过程中刺梨消化液在 $A_{700\text{nm}}$ 处吸光度值大小的变化,在模拟胃消化过程中,相较于空白对照组,模拟胃消化组和胃酸对照组进行消化时,刺梨在2 h内吸光度值逐渐增大 ($p < 0.05$),具有显著差异,2 h后趋于平稳。2 h模拟胃消化组刺梨消化液吸光度值为 $0.61 A_{700\text{nm}}$,2 h空白对照组刺梨消化液吸光度值为 $0.440 A_{700\text{nm}}$,同比增长1.48倍。2 h胃酸对照组刺梨消化液吸光度值为 $0.56 A_{700\text{nm}}$,增加1.27倍。在模拟肠消化过程中,刺梨消化液吸光度值有所下降 ($p > 0.05$),无明显差异,1 h后趋于稳定。相较于1 h空白对照组刺梨消化液吸光度值 $0.48 A_{700\text{nm}}$,1 h模拟肠消化组刺梨消化液吸光度值为 $0.49 A_{700\text{nm}}$,增势不明显。体外模拟肠消化1 h后其吸光度值增加不明显,可能是体外模拟肠消化中胆盐含量减少、pH值增加等原因,也可能与刺梨抗氧化成分的结构性质有关,还需要进一步研究探讨。由此说明胃蛋白酶、胃酸、可增加刺梨消化液吸光度值。还原力大小可直接反映出物质抗氧化活性的大小,由图可知胃蛋白酶、胃酸可增加刺梨抗氧化活性。

3 结论

本实验通过对贵州刺梨进行体外模拟胃肠消化实验,研究刺梨体外模拟消化时抗氧化成分及其活性的变化规律,实验结果表明,相较于空白组,刺梨模拟胃消化组0.5 h内多酚、黄酮、DPPH自由基清除率以及还原力有明显上升的趋势 ($p < 0.05$),最大分别增加1.48、1.35、1.14、1.48倍,之后趋于平稳。表明胃蛋白酶能促进贵州刺梨中抗氧化成分的释放及其活性的增加。实验结果表明,相较于空白实验,刺梨胃酸对照组0.5 h内多酚、黄酮、DPPH自由基清除率以及还原力有明显上升的趋势 ($p < 0.05$),最大分别增加1.28、1.21、1.07、1.41倍,之后趋于平稳,表明胃酸能促进贵州刺梨中抗氧化成分的释放及其活性的增加。实验结果表明,相较于空白实验,刺梨模拟肠消化组1 h内多酚、黄酮、DPPH自由基清除率以及还原力有明显上升的趋势 ($p < 0.05$),最大分别增加1.07、1.65、1.28、1.07倍,之后趋于平稳。表明胆盐、胰酶能促进贵州刺梨中抗氧化成分的释放及其活性的增加。因此,研究结果表明胃蛋白酶、胃酸、胆盐以及胰酶能促进贵州刺梨中抗氧化成分的释放及其抗氧化活性的增加。

参考文献

- [1] 曾芳芳,罗自生.刺梨营养成分的研究进展[J].浙江农业科学,2015,56(11):1753-1757
ZENG Fang-fang, LUO Zi-sheng. Research progress on nutrient composition of *Rosa roxburghii* Tratt [J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 56(11): 1753-1757
- [2] 何伟平,滕建文,朱晓韵,等.刺梨Vc和多酚成分稳定性及抗氧化性研究[J].轻工科技,2011,9:1-3
HE Wei-ping, TENG Jian-wen, ZHU Xiao-yun, et al. Study on stability and antioxidant activity of Vc and polyphenols in *Rosa roxburghii* Tratt [J]. Light Industry Science, 2011, 9: 1-3
- [3] Heinrich M, Frei H B, Leonti M. A perspective on natural products research and ethnopharmacology in Mexico: The eagle and the serpent on the prickly pear cactus [J]. Journal of Natural Products, 2014, 77(3): 678-89.
- [4] 张卿.体外人胃肠模拟系统的研究进展[J].生物化工,2016,2(4):65-68
ZHANG Qing. Research progress of human gastrointestinal simulation system *in vitro* [J]. Biochemistry, 2016, 2(4): 65-68
- [5] Ruth Martínez-Las Heras, Alicia Pinazo, Ana Heredia, et al. Evaluation studies of persimmon plant (*Diospyros kaki*) for

- physiological benefits and bioaccessibility of antioxidants by *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Chemistry, 2017, 214
- [6] Bidasolo I B, Ramos M, Gomez-Ruiz J A. *In vitro* simulated gastrointestinal digestion of donkeys' milk: Peptide characterization by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. International Dairy Journal, 2012, 24(2): 146-152
- [7] 胡义东.体外模拟消化条件下芒果抗氧化活性的变化研究[D].南宁:广西大学,2014
HU Yi-dong. Study on the changes of antioxidant activity of mango under simulated digestion *in vitro* [D]. Nanning: Guangxi University, 2014
- [8] 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 of polyphenols and antioxidant activities in hawthorn in gastrointestinal digestion *in vitro* [J]. Food Science, 2019, 40(5):31-37
- [9] 李玉珍,肖怀秋,姜明皎,等.体外人胃肠模拟系统在食物消化行为研究中的应用进展[J].中国酿造,2017,36(7):153-156
LI Yu-zhen, XIAO Huai-qiu, JIANG Ming-jiao, et al. Progress of *in vitro* human gastrointestinal simulation system in food digestion behavior research [J]. China Brewing, 2017, 36(7): 153-156
- [10] 从彦丽,彭梦雪,刘冬,等.柑橘在体外模拟胃肠消化过程中总多酚、总黄酮及总抗氧化活性的变化规律[J].食品科学,2016,37(17):96-103
CONG Yan-li, PENG Meng-xue, LIU Dong, et al. Changes of total polyphenols, total flavonoids and total antioxidant activity in citrus digestion during gastrointestinal digestion *in vitro* [J]. Food Science, 2016, 37(17): 96-103
- [11] Musci M, Yao S. Optimization and validation of folin-ciocalteu method for the determination of total polyphenol content of Pu-erh tea [J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 2017, 68(8): 1
- [12] Shi J Y, Zou X B, Zhao J W, et al. Determination of total flavonoids content in fresh ginkgo biloba leaf with different colors using near infrared spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A, 2012, 94(8): 271-276
- [13] 毛立忠,倪勤学,高前欣,等.菜籽油低共熔溶剂萃取物 DPPH 自由基清除能力研究[J].中国粮油学报,2018
MAO Li-zhong, NI Qin-xue, GAO Qian-xin, et al. Study on DPPH free radical scavenging ability of rapeseed oil eutectic solvent extract [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018
- [14] 韦献雅,殷丽琴,钟成,等.DPPH 法评价抗氧化活性研究进展[J].食品科学,2014,35(9):317-322
WEI Xian-ya, YIN Li-qin, ZHONG Cheng, et al. Research progress in evaluation of antioxidant activity by DPPH method [J]. Food Science, 2014, 35(9): 317-322
- [15] Yan-Yan G, Xian-Feng Z. Analysis on antioxidant activity of fruit Kombucha beverage [J]. Food Science and Technology, 2018
- [16] 李粉玲,蔡汉权,林泽平.红豆多糖抗氧化性及还原能力的研究[J].食品工业,2014,2:190-194
LI Fan-ling, CAI Han-quan, LIN Ze-ping. Study on antioxidant and reducing ability of red bean polysaccharide [J]. Food Industry, 2014, 2:190-194
- [17] Rajan Murugan, Rahul Chandran, Thangaraj Parimelazhagan. Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion of Phoenix loureirii on polyphenolics, antioxidant and acetylcholinesterase inhibitory activities [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016
- [18] Meyer J H. Gastric emptying of ordinary food: Effect of antrum on particle size [J]. The American Journal of Physiology, 1980, 239(3): 133-135
- [19] 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
LU Jun, DUN Hui-yu, XIANG Xiao-zhe, et al. Effects of *in vitro* simulated gastric and intestinal digestion on antioxidant components and their activities in six black foods [J]. Food Science, 2018, 39(5): 47-56
- [20] 梁会丽.黄酮类化合物与胃蛋白酶的相互作用及其对酶活性影响的研究[D].郑州:郑州大学,2014
LIANG Hui-li. Interaction of flavonoids with pepsin and its effect on enzyme activity [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014