

体外模拟胃肠消化对覆盆子抗氧化成分及其活性的影响

师 聪, 陈学红, 李 茹, 王雅楠, 解春芝*
(徐州工程学院 食品与生物工程学院 江苏徐州 221018)

摘要 以覆盆子为原料,采用体外模拟胃肠消化方法研究覆盆子总黄酮含量、总酚含量及抗氧化活性的变化规律,探讨其对覆盆子抗氧化成分及其活性的影响。结果表明:与空白试验相比,覆盆子在模拟消化中总黄酮含量、总酚含量、抗氧化活性明显上升。模拟胃消化总黄酮含量、总酚含量、总还原力、DPPH 自由基清除率和羟自由基清除率最大可达消化 0 h 的 2.53、1.23、1.34、1.03 倍和 1.22 倍,胃酸最大可达消化 0 h 的 1.26、1.17、1.32、1.02 倍和 1.12 倍,模拟肠液消化最大分别可达消化 0 h 的 0.91、0.93、1.22、1.08 倍和 1.07 倍。本研究表明覆盆子在模拟胃肠消化过程中,胃蛋白酶、胃酸和胰酶能促进覆盆子中抗氧化成分的释放及其活性的增加。

关键词 覆盆子; 总黄酮; 总酚; 模拟胃肠消化; 抗氧化活性

文章编号 1009-7848(2023)02-0083-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.02.008

覆盆子(*Rubus idaeus* L.)属于蔷薇科悬钩子属的一种植物,主要分布于我国安徽、江苏、浙江等地^[1]。覆盆子为药食同源^[2],有很长的使用历史,具有抗衰老、抗肿瘤、抗氧化、降血糖、降血脂等作用^[3]。另外,还可以调节人的生殖系统功能,起到补肾固精、助阳缩尿的作用^[4]。覆盆子具有很高的药用及保健价值,近年来被应用于食品和医药等行业^[5]。

覆盆子中不仅含有人体所必需的营养物质,还含有许多重要的生物活性成分^[6]。黄酮类和酚酸类化合物是覆盆子中主要活性成分,目前对于覆盆子中主要活性成分的研究,通常用有机溶剂提取后,测定提取物中总酚和总黄酮含量,并在体外评价其抗氧化活性^[7-9]。然而,人体胃肠道消化过程与有机溶剂提取活性成分的过程区别很大,前者是在胃的酸性环境和肠弱碱性环境中,通过体内消化酶的消化作用,使活性物质释放出来^[9],而后者依据的是相似相溶的原理。体外模拟胃肠消化系统是一种基于人体生理消化机能,用来模拟食物在胃肠中消化的生物学研究,具有操作简单、易行、试验周期较短的优点^[10-11]。许多研究者采用体

外模拟胃肠消化方法评价食物的抗氧化活性^[12-14]。目前关于覆盆子在体外模拟胃肠消化过程中抗氧化成分及其活性的变化未见报道。本文通过模拟胃肠消化系统,评价覆盆子总黄酮和总酚在模拟胃肠消化过程中的释放规律,采用 DPPH 自由基清除能力、羟自由基清除能力和总还原能力评价其抗氧化能力,为覆盆子的开发利用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

覆盆子,天侧堂旗舰店;没食子酸、胃蛋白酶、芦丁、DPPH、胰酶,上海宸鸿生物技术有限公司;硝酸铝、氯化钠、盐酸、福林酚、亚硝酸钠、氢氧化钠、无水乙醇,华欧试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

SHA-BA 双功能数显恒温振荡器,上海子期实验设备有限公司;752N 紫外-可见分光光度计,森亚仪器仪表公司;TD4 台式离心机,上海坤诚科学仪器有限公司;FE28 酸度计,晓晓仪器公司;FA2104N 电子天平,苏州江东精密仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 体外模拟胃消化 参考王智能等^[15]的方法并略有修改。称取胃蛋白酶 3.2 g 和氯化钠 2.0 g 于烧杯中,用盐酸和水混合溶液溶解,调节溶液的 pH=1.2,再定容至 1 000 mL,静置过夜后,即得胃消化液。胃消化处理:称取 1.0 g 覆盆子样品,按固

收稿日期: 2022-02-02

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(19KJA480002);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB550013)

第一作者: 师聪,男,博士生,实验师

通信作者: 解春芝 E-mail: 870299230@qq.com

液比 1:15 加入模拟胃消化液,充分混匀,置于 37 ℃、120 r/min 的恒温振荡器中分别振荡 0,0.5, 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 h,在 4 500 r/min 转速下离心 15 min 后,收集上清液备用。用不加胃蛋白酶的溶液作胃酸对照组,用氯化钠溶液做空白对照组。

1.3.2 体外模拟肠消化 参考李杰等^[16]的方法并略有修改。称取 6.8 g 的磷酸二氢钾于烧杯中,加入 250 mL 水溶解,然后加入 190 mL 0.2 mol/L 氢氧化钠溶液,再加入 10 g 胰酶,调节溶液的 pH=7.5±0.1,最后定容至 1 000 mL,即得模拟肠消化液。肠消化处理:称取 1.0 g 覆盆子样品,按固液比 1:15 加入模拟肠消化液,待充分混匀后,置于 37 ℃、120 r/min 的恒温振荡器中分别振荡 0,0.5, 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 h,在 4 500 r/min 转速下离心 15 min 后,收集上清液备用。用不加胰酶的溶液作空白对照组。

1.3.3 覆盆子总黄酮含量检测 采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃法测定总黄酮含量^[17]。在波长 510 nm 处测定不同含量芦丁溶液的吸光度,标准曲线方程为 $y=10.439x+0.0011$ ($R^2=0.9997$), x 为芦丁溶液的含量, y 为芦丁溶液吸光度,不同含量芦丁与吸光度的线性关系良好。根据已知标准曲线方程计算样品中总黄酮含量,最终表示为每克干样品中芦丁(RE)含量。

1.3.4 覆盆子总酚含量检测 采用福林-酚法的测定总酚含量^[18],在波长 765 nm 处测定不同没食子酸吸光度,标准曲线方程为 $y=98.143x+0.0146$ ($R^2=0.9973$), x 为没食子酸含量, y 为没食子酸溶液吸光度,不同含量的没食子酸与吸光度的线性关系良好。根据已知标准曲线方程计算样品中总酚含量,最终表示为每克干样品中没食子酸(GAE)含量。

1.3.5 覆盆子胃肠消化产物抗氧化活性

1.3.5.1 DPPH 自由基清除能力 参考文献^[19]和^[20]的方法,在 5 mL 试管中,加入 2 mL 的 0.04 mg/mL DPPH 溶液,再移入 2 mL 样品溶液混匀,室温避光反应 30 min,在波长 517 nm 处测定吸光度记为 A_1 ;按上述步骤,吸取 2 mL 无水乙醇和 2 mL 样品溶液混匀,测定吸光度记为 A_2 ;用无水乙醇代替样品溶液,测定吸光值为 A_0 。DPPH 自由基清除率公式如下:

$$\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

1.3.5.2 羟自由基清除能力 采用水杨酸法,利用 Fenton 反应测定羟自由基清除能力^[21-22],在 10 mL 试管中,加入 6 mmol/L H₂O₂ 溶液和相同浓度的 FeSO₄ 溶液各 1 mL,再移取 1 mL 样品溶液于 10 mL 试管中混匀,室温反应 10 min,最后向试管中加入 6 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液 3 mL 混匀,在波长 510 nm 处测定吸光度值记为 A_2 ;按上述步骤,用等体积的去离子水代替样品溶液,测定吸光度记为 A_0 ;用等体积去离子水代替水杨酸作对照组,测定吸光度记为 A_1 。羟自由基清除率公式同式(1)。

1.3.5.3 总还原力 采用普鲁士蓝还原法^[23-25],吸取 1 g/100 mL K₃Fe(CN)₆ 溶液和样品溶液各 1 mL 于 5 mL 试管中混合均匀,50 ℃条件下反应 20 min 后用 10% 三氯乙酸终止反应,再向试管中加入 0.1 g/100 mL 氯化铁溶液 0.4 mL 静置显色 10 min,在波长 700 nm 处测定吸光度值。

1.4 统计分析

所有指标测定均重复 3 次,采用 Microsoft office Excel 2013 软件对数据进行处理,采用 Sigma Plot 10.0 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 覆盆子体外模拟胃肠消化中总黄酮释放量的变化

模拟胃消化过程中总黄酮的释放量如图 1 所示,在胃消化 0.5 h 内,总黄酮释放量显著升高之后趋于稳定,胃液消化总黄酮释放量大于胃酸总黄酮释放量,空白对照在消化过程中总黄酮释放量没有显著变化,这表明在总黄酮的释放过程中,胃蛋白酶起主要作用,同时胃酸也能促进总黄酮的释放。模拟胃消化 3 h 过程中,覆盆子总黄酮最大释放量为 22.90 mg RE/g,为模拟胃消化 0 h 总黄酮释放量(9.04 mg RE/g)的 2.53 倍,为胃酸对照组总黄酮释放量最大值(11.39 mg RE/g)的 2.01 倍,为空白对照组总黄酮释放量最大值(11.12 mg RE/g)的 2.06 倍。模拟胃酸消化最大总黄酮释放量(11.39 mg RE/g)为胃酸消化 0 h 的 1.26 倍。模拟肠消化过程中总黄酮释放量如图 2 所示,在模

拟消化过程中, 肠液消化组和空白对照组总黄酮释放量整体呈下降趋势, 肠液消化组的总黄酮释放量始终大于空白对照组, 这表明胰酶可以促进总黄酮释放。体外模拟肠消化过程中覆盆子总黄

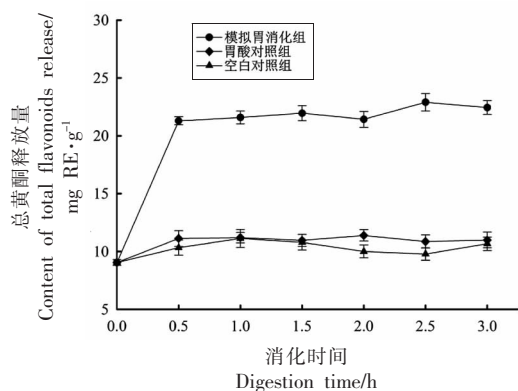


图 1 覆盆子体外模拟胃消化过程中总黄酮释放量的变化

Fig.1 Changes of total flavonoids release during gastric digestion simulated by raspberry *in vitro*

覆盆子总黄酮虽在模拟胃消化过程中释放量增加, 在模拟肠消化过程中总黄酮释放量降低, 但总黄酮释放量仍大于空白对照。这与从彦丽等^[26]在梨的模拟消化研究中的结果相似, 总黄酮主要在胃消化过程中释放, 在肠消化过程出现大量降解。可能是由于在低 pH 值的环境下, 分子之间的作用力减小促进了总黄酮的释放。另外, 胃蛋白酶和胰酶都可以水解蛋白质, 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^[27]。模拟肠消化总黄酮释放量降低, 这可能是由于胰酶与结合态的酚类物质发生反应, 导致酸性多酚大量降解, 也可能异构为其它碱性条件下稳定的形式, 释放的总黄酮小于降解的总黄酮, 导致总黄酮含量降低^[6]。

2.2 覆盆子体外模拟胃肠消化中总酚释放量的变化

模拟胃消化过程中总酚释放量的变化如图 3 所示, 在模拟胃消化和胃酸消化过程中, 覆盆子总酚释放量明显上升。模拟胃消化组最大总酚释放量为 37.5 mg GAE/g, 为模拟胃消化 0 h 总酚释放量 (30.57 mg GAE/g) 的 1.23 倍, 为胃酸对照组总酚释放量最大值 (35.8 mg GAE/g) 的 1.05 倍, 为空白对照组总酚释放量最大值 (33.8 mg GAE/g) 的

1.11 倍。模拟胃酸消化最大总酚释放量 (35.80 mg GAE/g) 为胃酸消化 0 h 的 1.17 倍。模拟胃液消化总酚释放量大于胃酸消化大于空白对照, 这表明胃蛋白酶和胃酸同样可以促进总酚的释放。覆盆子体外模拟肠消化过程中总酚释放量的变化如图 4 所示, 肠液消化和空白对照组总酚释放量整体呈下降趋势, 肠液消化组的总酚释放量大于空白对照组, 这表明胰酶同样能够促进总酚释放。体外模拟肠消化 3 h 后, 覆盆子总酚释放量为 34.12 mg GAE/g, 为模拟肠消化 0 h 总酚释放量 (36.88 mg GAE/g) 的 0.93 倍, 为空白对照组消化 3 h 后总酚释放量 (26.7 mg GAE/g) 的 1.28 倍。

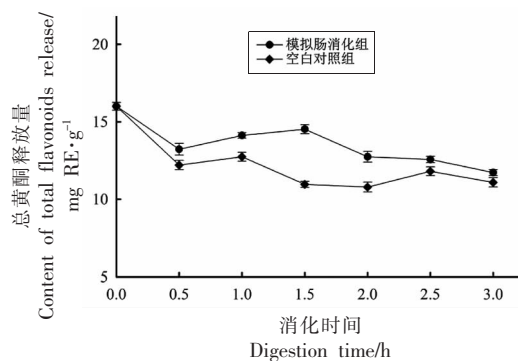


图 2 覆盆子体外模拟肠消化过程中总黄酮释放量的变化

Fig.2 Changes of total flavonoids release during intestinal digestion simulated by raspberry *in vitro*

1.11 倍。模拟胃酸消化最大总酚释放量 (35.80 mg GAE/g) 为胃酸消化 0 h 的 1.17 倍。模拟胃液消化总酚释放量大于胃酸消化大于空白对照, 这表明胃蛋白酶和胃酸同样可以促进总酚的释放。覆盆子体外模拟肠消化过程中总酚释放量的变化如图 4 所示, 肠液消化和空白对照组总酚释放量整体呈下降趋势, 肠液消化组的总酚释放量大于空白对照组, 这表明胰酶同样能够促进总酚释放。体外模拟肠消化 3 h 后, 覆盆子总酚释放量为 34.12 mg GAE/g, 为模拟肠消化 0 h 总酚释放量 (36.88 mg GAE/g) 的 0.93 倍, 为空白对照组消化 3 h 后总酚释放量 (26.7 mg GAE/g) 的 1.28 倍。

覆盆子在体外模拟胃消化过程中总酚释放量增加, 在模拟肠消化过程中总酚释放量降低, 这与从彦丽等^[28]研究的柑橘体外模拟胃肠消化总酚释放变化规律一致。模拟消化后总酚释放量提高的原因可能是由于较低的 pH 值及模拟胃的蠕动均可以降低覆盆子粒径, 分子间的作用力减小, 有利于总酚的释放^[28]。另外, 一部分与多酚氢键或疏水结合的蛋白质被胃蛋白水解, 促进了结合多酚的释放^[29]。在模拟肠消化过程中胰酶虽可能继续使结合态多酚释放为游离态, 但是酚酸不稳定容易降解在碱性环境条件下, 因此肠液消化过程中的总

酚释放量没有增加。在肠消化空白组,可能由于结合态多酚的释放已经平衡,酚酸降解导致总酚的

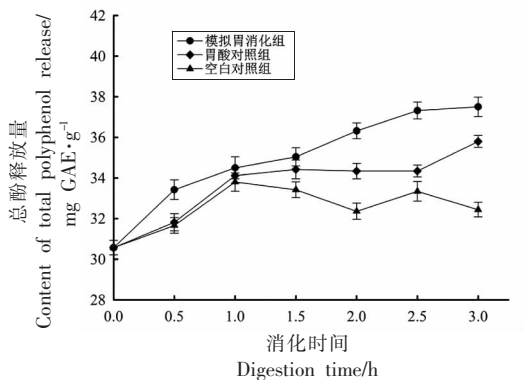


图3 覆盆子体外模拟胃消化过程中总酚释放量的变化

Fig.3 Changes of total polyphenol release during gastric digestion simulated by raspberry *in vitro*

2.3 覆盆子体外模拟胃肠消化中 DPPH 自由基清除率的变化

体外模拟胃消化过程中 DPPH 自由基清除率大小的变化如图 5 所示,模拟胃消化组和胃酸对照组 DPPH 自由基清除率逐渐增加。在模拟胃消化 3 h 过程中,DPPH 自由基清除率最大为 95.25%,为胃消化 0 h(92.55%)的 1.03 倍,为胃酸最大清除率(94.58%)的 1.01 倍,为空白对照组最大清除率(94.09%)的 1.01 倍。模拟胃酸消化最大 DPPH

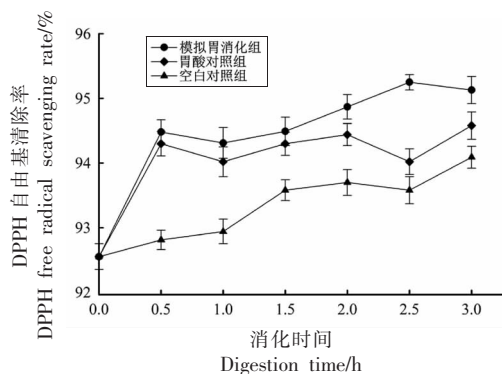


图5 覆盆子在体外模拟胃消化中 DPPH 自由基清除率的变化

Fig.5 DPPH free radical scavenging rate of raspberry *in vitro* simulated gastric digestion

2.4 覆盆子体外模拟胃肠消化中羟自由基清除率的变化

体外模拟胃消化过程中羟自由基清除率大小

含量降低^[9]。

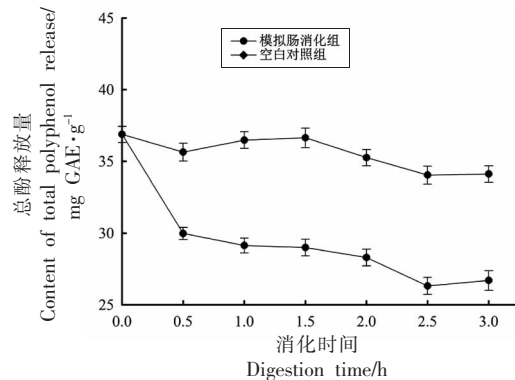


图4 覆盆子体外模拟肠消化过程中总酚释放量的变化

Fig.4 Changes of total polyphenol release during intestinal digestion simulated by raspberry *in vitro*

自由基清除率(94.58%)为胃酸消化 0 h 的 1.02 倍。模拟胃液消化组的 DPPH 自由基清除率大于胃酸对照组和空白对照组。在模拟肠消化过程中如图 6 所示,覆盆子肠液消化组在 1 h 内清除率达到最大值为 74.08%,为肠消化 0 h(68.52%)的 1.08 倍,1 h 后趋于稳定,而空白对照组在消化 0.5 h 出现显著性下降,随后上升并趋于稳定,自由基清除率最大值为 67.29%。

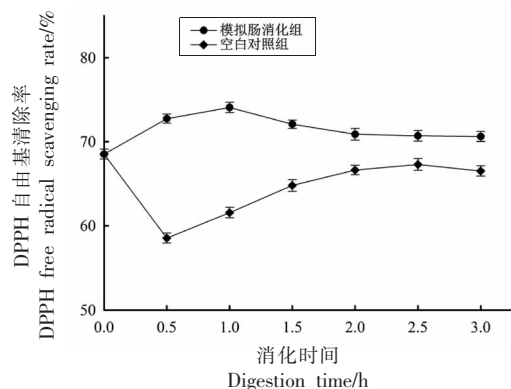


图6 覆盆子在体外模拟肠消化中 DPPH 自由基清除率的变化

Fig.6 DPPH radical scavenging rate of raspberry *in vitro* simulated intestinal digestion

的变化如图 7 所示,在模拟胃环境消化 0.5 h 内,模拟胃消化组和胃酸对照组羟自由基清除率显著增大,消化 2 h 模拟胃消化组清除率达到最大为

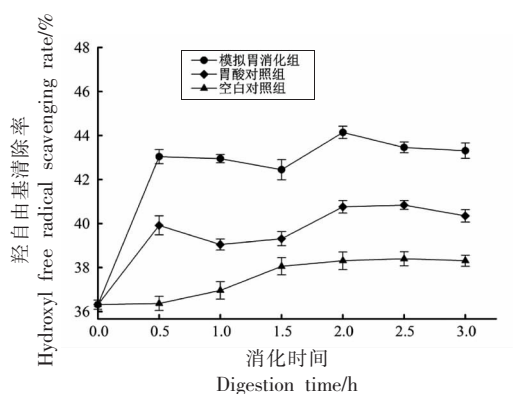


图 7 覆盆子在体外模拟胃消化中羟自由基清除率的变化
Fig.7 Hydroxyl free radical scavenging rate of raspberry *in vitro* simulated gastric digestion

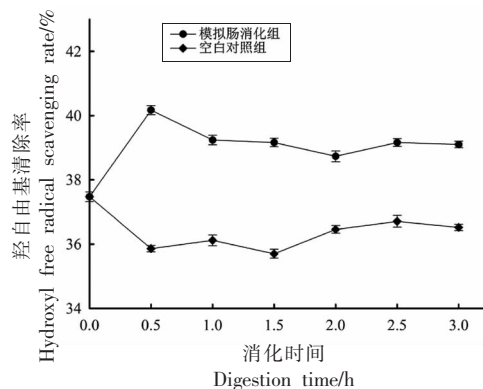


图 8 覆盆子在体外模拟肠消化中羟自由基清除率的变化
Fig.8 Hydroxyl free radical scavenging rate of raspberry *in vitro* simulated gastric digestion

44.14%,为胃消化 0 h(36.31%)的 1.22 倍,为胃酸对照组最大清除率(40.84%)的 1.08 倍,为空白对照组最大清除率(38.4%)的 1.15 倍。模拟胃酸消化最大羟自由基清除率(40.84%)为胃酸消化 0 h 的 1.12 倍。羟自由基清除率大小为模拟胃液消化组大于胃酸对照组及空白对照组。在模拟肠环境消化阶段如图 8 所示,覆盆子肠液消化组在 0.5 h 内清除率达到最大值为 40.17%,为肠消化 0 h (37.47%) 的 1.07 倍,随后清除率下降并趋于稳定。而空白对照组在消化 0.5 h 出现显著性下降,随后趋于稳定,且模拟肠消化组的羟自由基清除率大于空白对照组。

2.5 覆盆子体外模拟胃肠消化中总还原力的变化

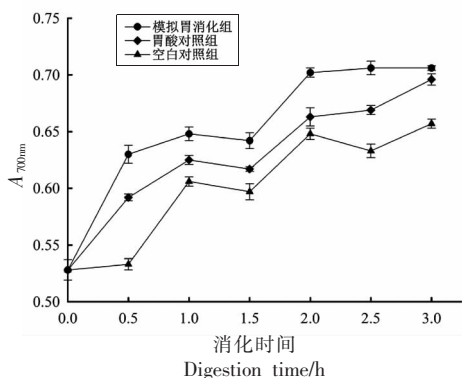


图 9 覆盆子在体外模拟胃消化中总还原力的变化
Fig.9 Reduction force of raspberry *in vitro* simulated gastric digestion

体外模拟胃消化过程中总还原力的变化如图 9 所示,在模拟胃消化过程中,模拟胃消化组和胃酸对照组总还原力逐渐增大。模拟胃消化组最大吸光度值为 0.706,为胃消化 0 h 吸光度值(0.528)的 1.34 倍,为胃酸最大吸光度值(0.696)的 1.01 倍,为空白对照组最大吸光度(0.657)的 1.07 倍。模拟胃酸消化最大吸光度值(0.696)为胃酸消化 0 h 的 1.32 倍。在模拟肠消化过程中如图 10 所示,覆盆子肠液消化组在 2 h 内逐渐增大,并达到最大吸光度值为 0.79,为肠消化 0 h (0.646) 的 1.22 倍,随后趋于稳定,肠空白对照组在消化 1.5 h 吸光度值达到最大 0.709,模拟肠消化组总还原力大于空白对照组。

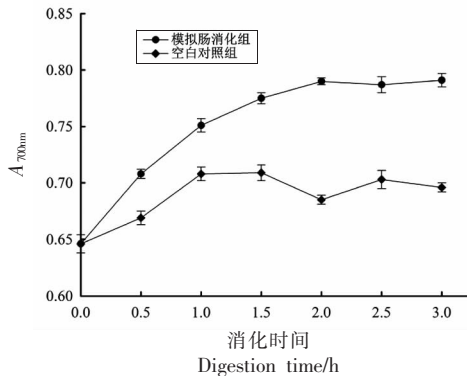


图 10 覆盆子在体外模拟肠消化中总还原力的变化
Fig.10 Reduction force of raspberry *in vitro* simulated intestinal digestion

3 结论

通过对覆盆子进行体外模拟胃肠消化,测定

消化过程中总酚和总黄酮的释放及抗氧化活性的变化发现,在模拟胃消化过程中,胃蛋白酶和胃酸

均可以促进总黄酮和总酚的释放及抗氧化活性的提高,与消化0h相比,覆盆子胃消化总黄酮和总酚最大释放量分别是其2.53倍和1.23倍,DPPH和羟自由基最大清除率以及最大总还原力分别是其1.03,1.22倍和1.34倍。模拟胃酸消化总黄酮、总酚、总还原力、DPPH和羟自由基清除率最大分别是其1.26,1.17,1.32,1.02倍和1.12倍。在模拟肠环境消化阶段,胰酶可以促进总酚和总黄酮的释放及抗氧化活性的提高,与消化0h相比,总黄酮和总酚最大释放量分别是其0.91倍和0.93倍,DPPH和羟自由基最大清除率以及最大总还原力分别是其1.08,1.07倍和1.22倍。抗氧化活性是体系中所有抗氧化物质发挥协同和拮抗作用的结果,由于覆盆子消化产物是一个混合组分,目前的研究并不能阐明其中具体的活性组分及其作用机制,因此有必要对其进行分离纯化,利用高效液相色谱测定结构,并使用核磁共振技术从分子结构层面对其抗氧化机制进行分析。

参 考 文 献

- [1] 王丽,王振宇,樊梓鸾,等. 树莓总多酚及其抗氧化功能研究[J]. 中国林副特产, 2011, 114(5): 17-20.
WANG L, WANG Z Y, FAN Z L, et al. Determination of polyphenol content and *in vitro* antioxidant activity of raspberry[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2011, 114(5): 17-20.
- [2] 杨静,武彦辉,刘缘晓,等. 树莓干果总黄酮纯化前后活性比较[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(23): 1-5.
YANG J, WU Y H, LIU Y X, et al. Comparison activity of total flavonoids from raspberry dry fruit before and after purification[J]. Food Research and Development, 2015, 36(23): 1-5.
- [3] 朱会霞. 覆盆子黄酮抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(10): 1302-1305.
ZHU H X. Study on the antioxidant activity of raspberry flavones [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(10): 1302-1305.
- [4] 扈婧. 覆盆子活性物质提取工艺的优化[J]. 食品科技, 2014, 39(11): 238-241.
HU J. Optimization on the extraction of active agent for raspberry[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(11): 238-241.
- [5] HUMMER K E. Rubus pharmacology: Antiquity to the present[J]. Hortence A Publication of the American Society for Horticultural-ence, 2010, 45(11): 1587-1591.
- [6] 师聪,李哲,陈尚龙,等. 树莓饼干加工工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(9): 52-56.
SHI C, LI Z, CHEN S L, et al. Study on the processing technology of raspberry biscuits[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(9): 52-56.
- [7] 孙金旭. 覆盆子干果黄酮提取研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(9): 14-17.
SUN J X. The study of flavone extracting for dried raspberry[J]. Food Research and Development, 2012, 33(9): 14-17.
- [8] 王苏音,金清. 覆盆子多酚的提取工艺及体外抗氧化活性研究[J]. 吉林医药学院学报, 2018, 39(3): 174-177.
WANG S Y, JIN Q. Extraction process of raspberry polyphenols and its antioxidant activity *in vitro* [J]. Journal of Jilin Medical University, 2018, 39(3): 174-177.
- [9] 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, 296.
PENG M X, CONG Y L, LIU D. 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, 296.
- [10] 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.
NI X Y, ZHONG K, TONG L T, et al. Changes in polyphenols content and antioxidant activity during *in vitro* digestion of brown rice[J]. Food Science, 2018, 39(16): 105-111.
- [11] 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.
- [12] PAVAN V, SANCHO R A S, PASTORE G M. The effect of *in vitro* digestion on the antioxidant activity

- of fruit extracts (*Carica papaya*, *Artocarpus heterophyllus* and *Annona marcgravii*) [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 59(2): 1247-1251.
- [13] CORREA-BETANZO J, ALLEN-VERCOE E, McDONALD J, et al. Stability and biological activity of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium*) polyphenols during simulated *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165(15): 522-531.
- [14] BOUAYED J, DEUBER H, HOFFMANN L, et al. Bioaccessible and dialysable polyphenols in selected apple varieties following *in vitro* digestion vs. their native patterns[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(4): 1466-1472.
- [15] 王智能, 王允, 吴光旭, 等. 体外模拟胃肠消化对不同热处理荷叶中酚类物质释放量及抗氧化活性的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(10): 1975-1982.
WANG Z N, WANG Y, WU G X, et al. Effects of simulated *in vitro* gastrointestinal digestion on phenolics release and antioxidant activity in different heat treatment lotus leaves[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(10): 1975-1982.
- [16] 李杰, 董丽红, 苏东晓, 等. 体外消化对银杏果酚类物质含量及其抗氧化活性的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(6): 98-104.
LI J, DONG L H, SU D X, et al. Effects of simulated digestion on contents and antioxidants of phenolics in Ginkgo fruits [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(6): 98-104.
- [17] 袁媛, 余修亮, 陈宇欢, 等. 桃金娘花青素和黄酮的提取方法比较及其抗氧化能力研究[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(9): 144-151.
YUAN Y, YU X L, CHEN Y H, et al. Comparison of extracting methods for anthocyanins and flavonoids of *Rhodomyrtus tomentosa* and studies on their antioxidant activity[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(9): 144-151.
- [18] 忻晓庭, 刘大群, 郑美瑜, 等. 热风干燥温度对冰菜干燥动力学、多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(11): 148-156.
XIN X T, LIU D Q, ZHENG M Y, et al. Effects of hot air drying temperature on drying kinetics, polyphenol content and antioxidant activity of ice plant[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(11): 148-156.
- [19] 魏炜, 李彦伟, 刘凤霞, 等. 响应面法优化超高压提取黄精多糖工艺[J]. *精细化工*, 2019, 36(5): 875-881.
WEI W, LI Y W, LIU F X, et al. Optimization of ultrahigh pressure extraction of polysaccharides from *Polygonatum cyrtoneuma* hua by response surface methodology[J]. *Fine Chemicals*, 2019, 36(5): 875-881.
- [20] 王全泽, 袁堂丰, 刘磊磊, 等. 响应面法优化闪式提取罗汉松总黄酮及其抗氧化活性[J]. *精细化工*, 2018, 35(1): 65-71, 148.
WANG Q Z, YUAN T F, LIU L L, et al. Flavonoids of flash extraction of total from leaves of *Podocarpus Macrophyllus* by response surface method and their antioxidant activity [J]. *Fine Chemicals*, 2018, 35(1): 65-71, 148.
- [21] 王宗成, 蒋玉仁, 刘小文, 等. 响应面优化生姜茎叶总黄酮提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2015, 27(9): 1582-1588.
WANG Z C, JIANG Y R, LIU X W, et al. Optimization of extraction of total flavonoids from *Zingiber officinale* Roscoe stem and leaves using response surface methodology and evaluation of its antioxidant activity [J]. *Natural Product Research and Development*, 2015, 27(9): 1582-1588.
- [22] 祁小妮, 王俊龙, 李振亮, 等. 微波辅助骨碎补黄酮的提取及抗氧化活性研究[J]. *精细化工*, 2018, 35(7): 1170-1175, 1181.
QI X N, WANG J L, LI Z L, et al. Microwave-assisted extraction and antioxidant activities of flavonoids from *drynaria* rhizome[J]. *Natural Product Research and Development*, 2018, 35(7): 1170-1175, 1181.
- [23] 李丽丽, 孙泽宇, 刘雄民, 等. 柠檬桉树脂总黄酮的提取纯化及抗氧化活性[J]. *精细化工*, 2019, 36(8): 1571-1577.
LI L L, SUN Z Y, LIU X M, et al. Extraction, purification and antioxidant activities of total flavonoids in *Eucalyptus citriodora* resin[J]. *Fine Chemicals*, 2019, 36(8): 1571-1577.
- [24] 赵秀玲, 李慕原, 党亚丽. 杭白菊中多酚物质的提取及其抗氧化活性[J]. *精细化工*, 2018, 35(6): 974-981, 986.
ZHAO X L, LI M Y, DANG Y L. Optimization of extraction process of polyphenols from *Chrysanthemum morifolium* Ramat. and their antioxidant activity [J]. *Fine Chemicals*, 2018, 35(6): 974-981, 986.

- [25] 赵玉红, 师帅帅, 张立钢. ‘鲁赫’刺蔷薇叶不同溶剂提取物的活性成分及抗氧化性比较[J]. 现代食品科技, 2019, 35(5): 159-166.
ZHAO Y H, SHI S S, ZHANG L G. Bioactive compounds extracted by different solvents from *Rosa acicularis* ‘Luhe’ leaves and their antioxidant activity [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 159-166.
- [26] 从彦丽, 彭梦雪, 王慧清, 等. 梨体外模拟胃肠消化过程中多酚、黄酮及抗氧化活性的变化规律[J]. 现代食品科技, 2016, 32(6): 29-34, 84.
CONG Y L, PENG M X, WANG H Q, et al. Changes in polyphenol and flavonoid content and antioxidant activity of pears during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(6): 29-34, 84.
- [27] 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 H L. Studies on the interaction between pepsin and flavonoids and their effects on enzyme activity[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [28] 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 Y L, PENG M X, LIU D, et al. Changes in total polyphenols, total flavonoids and antioxidant activity of *Citrus* during *in vitro* gastrointestinal digestion process [J]. Food Science, 2016, 37(17): 96-103.
- [29] 万红霞, 孙海燕, 赵旭, 等. 糙米、米糠和精米在体外模拟消化过程中抗氧化活性的变化规律[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(1): 93-99.
WAN H X, SUN H Y, ZHAO X, et al. Changes in antioxidant activity regularity in brown rice, rice bran and polished rice during *in vitro* simulated digestion process [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(1): 93-99.

Effects of *in Vitro* Simulated Gastrointestinal Digestion on Antioxidant Components and Activity of Raspberry

Shi Cong, Chen Xuehong, Li Ru, Wang Yanan, Xie Chunzhi*

(School of Food and Biological Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, Jiangsu)

Abstract The changes of total flavonoids content, total polyphenols content and antioxidant activities in raspberry was studied by *in vitro* simulated gastrointestinal digestion, and the effects of antioxidants on the antioxidant components and activity of raspberry were studied. Results showed that total flavonoids content, total polyphenolics content, reducing power, DPPH· and ·OH scavenging rate of raspberry increased significantly during simulated gastric digestion compared with the blank experiment. The maximum amount of total flavonoids, total phenolics content, reducing power, DPPH· and ·OH scavenging rate of raspberry during the gastric digestion process were 2.53, 1.23, 1.34, 1.03 times and 1.22 times greater than the amount at 0 h, respectively. The gastric acid control group were raised 1.26, 1.17, 1.32, 1.02 times and 1.12 times greater than the amount at 0 h, respectively. During simulated intestinal digestion, the maximum increased by 0.91, 0.93, 1.22, 1.08 times and 1.07 times greater than the amount at 0 h, respectively. The results showed that pepsin, gastric acid and pancreatic enzyme could promote the release of antioxidants and increase the activity of raspberry.

Keywords raspberry; total flavonoids; total phenolics; simulated gastrointestinal digestion; antioxidant activity