

体外模拟胃肠消化过程中猕猴桃抗氧化成分及活性的变化

王 静, 韩 莹, 罗 茜, 刘 洋, 陈雪峰

(陕西科技大学 食品与生物工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 研究猕猴桃果浆和果汁在体外模拟胃肠消化过程中多酚黄酮类物质含量及抗氧化活性的变化规律。采用铁还原力, 以及 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基、羟自由基清除法测定抗氧化性。结果显示, 消化后多酚和黄酮物质释放量增加。果浆消化后最大释放量分别为消化前的 1.62 倍和 2.40 倍; 果汁消化后多酚、黄酮的最大释放量分别是消化前的 1.63 倍和 2.90 倍。果汁、果浆的 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基和羟自由基清除率以及铁还原力均在模拟胃消化 1 h 和肠消化 1 h 后达到最大值, 随后开始下降并趋于稳定。果浆和果汁的抗氧化能力虽不同, 但变化规律类似。研究表明, 模拟胃肠消化能促进猕猴桃多酚、黄酮的释放, 提高抗氧化活性。

关键词: 猕猴桃; 胃肠消化; 抗氧化; 多酚; 类黄酮

中图分类号: TS 201 文章编号: 1673-1689(2020)11-0049-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.11.007

Changes of Antioxidant Components and Activities in Kiwifruit after Simulated Gastrointestinal Digestion *in vitro*

WANG Jing, HAN Ying, LUO Qian, LIU Yang, CHEN Xuefeng

(School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: To explore the changes of polyphenols and flavonoids content and antioxidant activity during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion of kiwifruit (pulp and juice), the antioxidant activity was evaluated by the ferric reducing antioxidant power assay and the radical scavenging capacity of DPPH, superoxide anion and hydroxyl. The results showed that the release of polyphenols and flavonoids increased after digestion. For kiwifruit pulp, the maximum amounts of polyphenols and flavonoids were 1.62 and 2.40 times of that before digestion, while 1.63 and 2.90 times for juice. The radical scavenging rates of DPPH, superoxide anion and hydroxyl, as well as ferric reducing antioxidant power of juice and pulp reached the maximum after 1 h digestion, then declined and gradually stabilized. Different antioxidant capacity with similar variation of pulp and juice is observed. Studies indicate that simulated gastrointestinal digestion can promote the release of polyphenols and flavonoids, and improve antioxidant activity.

Keywords: kiwifruit, gastrointestinal digestion, antioxidant, polyphenols, flavonoids

收稿日期: 2020-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(21707086); 陕西省自然科学基金计划一般项目(青年)(2019JQ-453)。

作者简介: 王 静(1987—), 女, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事食品因子功能活性及其作用机制方面的研究。

E-mail: wangjingsp@sust.edu.cn

猕猴桃营养价值高,富含多种矿物质、维生素、氨基酸等基本营养素以及多酚、黄酮等多种具有抗氧化活性的物质,能为人类健康带来诸多益处^[1-2]。

正常机体氧化还原是处于一种稳定状态,若此平衡状态失衡会导致细胞组织氧化损伤,危害机体健康。因此,控制自由基的产生并有效提高抗氧化能力一直是研究热点^[3-4],而食物中的抗氧化活性物质备受国内外学者青睐。目前有关物质活性成分的研究,传统研究方法采用的大多是以化学溶剂提取原料中的活性成分从而得到所需数据,但由于机体是复杂环境这一客观事实,该法未能揭示活性成分在人体胃肠道中的消化过程以及消化进程中可能出现的种种变化,对活性物质的真实代谢、变化规律不能完全揭示,所以得到的研究结果虽具有一定价值但仍需其他研究方法进行补充。体外模拟胃肠消化法能够将人体的胃肠道环境更加真实模拟出来,所得结果与食品在人体的真实内环境中产生的变化基本相符,且实验周期短,重现性好,节省材料,方便易操作。因此,采用体外模拟胃肠消化法对食品的抗氧化活性进行评估比传统化学方法更为科学^[5-8]。

目前有关猕猴桃活性成分以及抗氧化的研究很多^[1,9-10],但基于体外模拟胃肠消化评估其抗氧化活性的研究却非常罕见^[11]。因而,选择猕猴桃作为本次试验的研究材料,采用体外胃肠模拟消化体系,分别检测胃肠消化前后猕猴桃中的多酚和黄酮类物质的释放量,比较胃肠消化前后猕猴桃抗氧化活性产生的变化,并对其变化规律做出分析,为完善猕猴桃的体内代谢研究提供依据,对丰富果蔬营养健康理论及指导猕猴桃资源的合理开发利用都具有重要价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

徐香猕猴桃:购于陕西省眉县农贸市场;福林-酚试剂、没食子酸标准品、芦丁标准品:购自天津天力化学试剂有限公司;Tris-HCL、DPPH·、胃蛋白酶、胰蛋白酶:购于广州市左克生物科技发展有限公司;猪胆盐:购于北京华迈科生物技术有限责任公司。

1.2 仪器与设备

SHZ-82A 水浴恒温振荡器:上海博珍仪器设备

制造厂制造;GT15RT 台式冷冻离心机:上海浦东天本离心机械有限公司产品;MJ-BL25B2 榨汁机:美的集团产品;varioskan flash 全波长扫描式多功能酶标仪:赛默飞世尔科技有限公司(芬兰)产品;ST3100 pH 计:奥豪斯仪器有限公司产品。

1.3 方法

1.3.1 样品制备 猕猴桃果浆(原浆):猕猴桃去皮后果肉与 0.9% 质量分数的 NaCl 混合,榨汁机打碎,制成匀浆液样品。

猕猴桃果汁:将果浆离心后取上清液加入等量蒸馏水稀释为果汁样品。

1.3.2 体外模拟胃肠消化 模拟胃液^[12]:将 10 g 胃蛋白酶充分溶解于浓度为 2.75 mol/L HCl 中,加蒸馏水定容至 1 L,并调节溶液至最终 pH 值为 1.3。

模拟肠液^[13]:将 10 g 胰蛋白酶及 25 g 猪胆盐溶液充分溶解于 0.1 mol/L NaHCO₃ 中,加蒸馏水定容至 1 L,并调节溶液最终 pH 值为 7。

模拟胃消化:37 ℃水浴处理待测样品,加入模拟胃液定容至 1 L,HCl 调节样品溶液 pH 值至 1.3,恒温水浴振荡器中进行消化,消化条件为 37 ℃、100 r/min。

模拟肠消化:取胃消化 2.0 h 后的样品,加入模拟肠液定容至 1 L,NaHCO₃ 调节待测样品溶液 pH 值 7,放入恒温水浴振荡器中进行消化,消化条件与模拟胃消化相同。

1.3.3 抗氧化活性物质含量测定 多酚:多酚含量以福林-肖卡法测定^[14]。以没食子酸(色谱纯)做标曲,测定结果以没食子酸当量(mg)/鲜质量(g)进行表示。

总类黄酮:总类黄酮含量以氯化铝-亚硝酸钠比色法测定^[15]。以芦丁(色谱纯)做标曲,测量结果以芦丁质量(mg)/猕猴桃鲜质量(kg)表示。

1.3.4 抗氧化活性

1) DPPH 自由基清除率 参考相关文献 [16] 中的方法,对 DPPH 自由基清除率进行检测。取样品溶液与 DPPH-乙醇溶液(0.2 mmol/L)各 2 mL 混合,避光处静置反应 30 min,空白组中样品以蒸馏水代替,对照组中 DPPH-乙醇溶液以乙醇代替,测定 OD_{517nm}(OD 值以 A 表示)。按式(1)计算测样品中的 DPPH 自由基清除率

$$C = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\%$$

式中, C 为 DPPH 自由基清除率; A_0 为空白组(无样品)测量值; A_1 为试验组(加样品和试剂)测量值; A_2 为对照组(无试剂)测量值。

2) 超氧阴离子自由基清除率 参考相关文献[17]中的方法并做相应调整,25℃水浴处理 3 mL Tris-HCl 缓冲液 20 min,结束后加入样品 1 mL,7 mmol/L 邻苯三酚溶液 3 mL,浓盐酸 1 mL;空白组中样品以蒸馏水代替,对照组中邻苯三酚溶液以蒸馏水代替,混匀,测定 $OD_{420\text{ nm}}$ 。按式(1)对超氧阴离子自由基清除率进行计算。

3) 铁离子还原力 取 15 mL 的离心管,加入 pH 6.6 的磷酸盐缓冲液,不同浓度的样品液和 1% 质量分数的铁氰化钾溶液各 2 mL,50℃水浴 20 min 后迅速冷却,加入质量分数 10% 的三氯乙酸(TCA) 2 mL,3 000 r/min 离心 10 min,取上清液 2 mL 置于比色管,加 2 mL 蒸馏水及质量分数 0.1% 的三氯化铁 0.4 mL,混合均匀,反应 10 min,对照组加入 2.4 mL 蒸馏水,测定 $OD_{700\text{ nm}}$ 。

4) 羟自由基清除率^[18] 水杨酸法可以有效鉴定体系中的羟自由基,向试管中加入待测样品 2 mL(空白组不加),按序加入 6 mmol/L $FeSO_4$ 溶液(对照组不加)、2.5 mmol/L H_2O_2 溶液各 2 mL(对照组不加),静置 10 min,继续加入 6 mmol/L 水杨酸乙醇溶液 2 mL(对照组不加),蒸馏水定容至 10 mL,37℃水浴 30 min,水浴完成后,3 000 r/min 离心 10 min,取上清液测定 $OD_{510\text{ nm}}$ 。照公式(1)对羟自由基清除率进行计算。

1.4 数据处理方法

所有试验均设 3 组平行,数据表示为平均值±标准差。使用 Origin 9.0 软件对数据进行统计与差异性分析,与同组数据中消化 0.5 h 组比较,* 差异显著($P<0.05$),** 差异极显著($P<0.01$)。

2 结果与分析

2.1 多酚含量

广泛存在于植物中的酚类化合物,由于其羟基取代的高反应性和吞噬自由基的能力而有很好的抗氧化活性,因此通过对样品多酚含量的测定可以反映其抗氧化性的强弱。

图 1 为果浆和果汁在不同消化时间里多酚释放量的变化情况,以消化组相对于未消化组的释放倍数作图可以直观地表现出两者的变化过程。

由图 1 可知,胃肠消化可以促进猕猴桃多酚的释放。猕猴桃果浆中多酚在模拟胃消化的 0.5、1、2、3 h 多酚释放量分别是未消化组的 1.05、1.26、1.24、1.28 倍,在模拟肠消化的 0.5、1、2、3 h 多酚释放量分别是未消化组的 1.42、1.62、1.38、1.34 倍。猕猴桃果汁在模拟胃消化 0.5、1、2、3 h 多酚的释放量分别是未消化组的 1.19、1.67、1.59、1.58 倍,在肠消化 0.5、1、2、3 h 多酚的释放量分别是未消化组的 2.74、2.89、2.67、2.70 倍。结果表明,模拟肠消化组释放量大于胃消化组释放量,在肠液环境,胰酶可能继续使结合态多酚释放为游离态,因而含量有所增加。在胃消化 1 h 多酚释放量最多,在 2 h 以后基本保持稳定。肠消化阶段,果汁、果浆均在消化 1 h 时多酚释放量最多,1 h 以后降低,2 h 后多酚释放量基本稳定。果浆和果汁组,多酚释放量的变化规律基本一致。无论是肠消化还是胃消化,在消化 1 h 达到峰值后均会开始呈一定程度的下降趋势,这可能是随着消化时间的延长,一些稳定性差的多酚发生降解。而消化 2 h 后多酚含量基本稳定,可能是因为结合态多酚的释放和降解已经平衡。

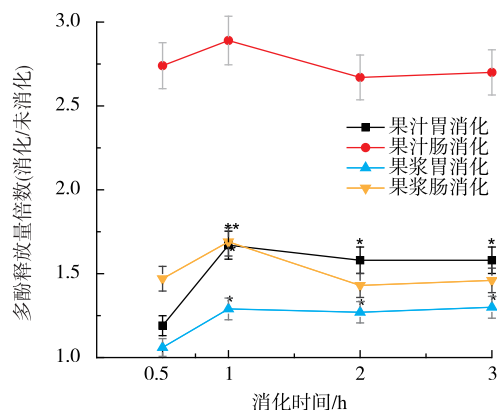


图 1 果浆及果汁消化后多酚释放量

Fig. 1 Total polyphenol content in pulp and juice after digestion

2.2 总类黄酮含量

猕猴桃果浆和果汁分别通过胃、肠消化阶段进行不同时间的消化后,总类黄酮含量的变化如图 2 所示。

由图 2 可见,猕猴桃果浆在模拟胃消化 0.5、1、2、3 h 类黄酮的释放量分别是未消化组的 1.19、1.54、1.27、1.36 倍。模拟肠消化 0.5、1、2、3 h 类黄酮的释放量分别是未消化组的 1.82、2.04、1.92、1.94

倍。猕猴桃果汁在模拟胃消化 0.5、1、2、3 h 类黄酮的释放量分别是未消化组的 1.20、1.67、1.58、1.58 倍,在模拟肠消化 0.5、1、2、3 h 类黄酮的释放量分别是未消化组的 2.73、2.90、2.67、2.70 倍。结果表明,肠消化组释放量大于胃消化组释放量,肠消化促进黄酮类物质的释放。经过胃消化以及肠消化后,猕猴桃类黄酮释放量在消化 1.0 h 内明显升高,随后基本稳定。黄酮的变化与多酚的变化相似。

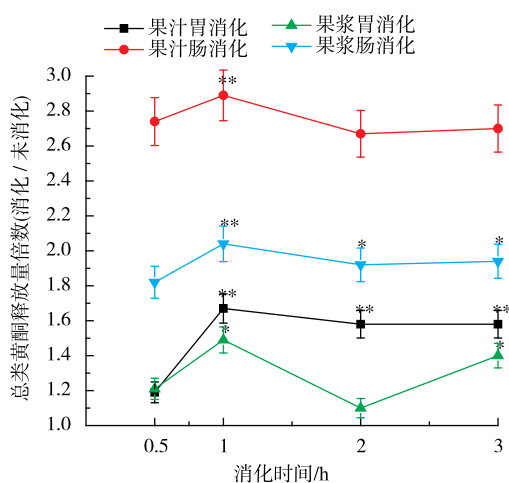


图2 果浆及果汁消化后总类黄酮释放量

Fig. 2 Total flavonoids content in pulp and juice after digestion

胃蛋白酶、胰酶在水解猕猴桃中的蛋白质时,破坏蛋白质与多酚、黄酮之间的化学键,释放结合态多酚、黄酮;猕猴桃中含的原花青素等,在较低的 pH 环境更易水解,也可能对多酚物质的水溶性有一定的提高作用,所得结果与 JAYAWARDENA^[19-20]等报道一致。

在模拟消化过程中,随着消化时间的延长,多酚、黄酮可能开始降解导致含量减少。肠液环境可能也不利于酸性多酚存在,只能通过降解、氧化或异构等途径转化。此过程中总黄酮含量降低,可能是因为稳定性较差的原花青素、花色苷等出现部分降解^[21-23]。

2.3 DPPH 自由基清除率

猕猴桃果浆和果汁通过胃肠消化阶段进行不同时间的消化后,DPPH 自由基清除率的变化情况如图 3 所示。

生物体内存在抗氧化防御系统来维持氧化和抗氧化体系的动态平衡。而当各种因素打破这一平衡时,过量自由基就会引起细胞结构和功能的破

坏,导致衰老和一系列病理过程。DPPH 自由基体系是体外评判抗氧化物质清除自由基能力的常用体系。DPPH 自由基是以氮为中心的自由基,在 517 nm 处有一特征吸收峰,向 DPPH 自由基溶液中加入抗氧化物质,孤对电子被配对,致使其最大吸收波长处的吸收消失或减弱。因此,通过测定吸收减弱的程度,可以评价抗氧化物质的活性强弱。

由图 3 可见,在模拟胃消化过程中,果浆和果汁的 DPPH 自由基清除率均在胃消化 1 h 内显著升高并达到最大值((89.44±0.50)%、(88.90±0.63)%),然后下降并趋于稳定。而模拟肠消化,消化 0.5 h 的样品其自由基清除率明显低于胃消化组,消化 1 h 达最大值,随后略微下降趋于稳定(50%~60%)。

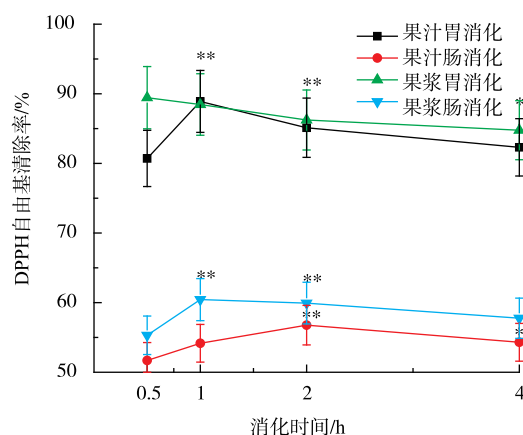


图3 果浆和果汁 DPPH 自由基清除率

Fig. 3 DPPH radical scavenging capacity of pulp and juice

对比发现,肠消化样品的 DPPH 自由基清除率较胃消化样品有所下降,而图 1 和图 2 结果却显示,肠消化后,多酚、黄酮含量有所增加,这与图 3 结果看似相悖,但却也是合理的。因为猕猴桃除了多酚、黄酮,还含有其他抗氧化活性成分如维生素、多糖和有机酸^[24]。DPPH 自由基清除能力表征的是样品中所有具有 DPPH 自由基清除活性的抗氧化成分的综合效果。虽然肠消化过程中,多酚、黄酮含量较高,但肠液环境中,有机酸并不能大量稳定存在。而多糖组成的糖苷键连接,以及结构修饰基团等,都对酸碱环境敏感^[25]。对自由基清除能力有贡献的其他成分可能被降解或破坏,最终总的自由基清除能力下降。此外,也有研究表明,抗氧化活性物质同时存在时,并不是简单的加和增效,可能存在相互影响,如蛋白质、多糖与多酚之间涉及的共价键与非共价键的相互作用影响多酚抗氧化活性和蛋

白质糖基化。而李俦等^[26]研究发现,酚类化合物单体混合后,胃肠道消化对其作用均有一定程度的影响,特别是模拟肠消化对各酚类化合物的影响明显不同。猕猴桃消化过程中,特别是在肠消化液中各种抗氧化物质之间可能也存在类似的相互作用,从而导致自由基清除能力下降,具体原因有待后续进一步探究。

2.4 超氧阴离子自由基清除率

超氧阴离子自由基是氧在生物体内形成的第一个氧自由基,除了自身的毒性危害,它还可以经一系列反应衍生为其他活性氧,如羟基和过氧化氢,进一步损伤生物体。

猕猴桃果浆和果汁进行胃肠消化后,两者对超氧阴离子自由基清除率的变化情况如图4所示。在消化1 h时,胃、肠消化组样品的自由基清除率均达到最大值。之后,胃消化组基本保持稳定,肠消化组持续下降且降幅明显。胃消化组超氧阴离子自由基清除率大于肠消化组。该实验结果与DPPH自由基(见图3)的结果基本一致,可能是样品中含有其他抗氧化活性成分造成的,如有机酸^[27]、维生素、多糖等。所以经胃肠消化后,虽然样品中的多酚和黄酮类物质都得到释放,但在偏中性的肠液中有有机酸发生降解,同时多糖、维生素C、维生素E与多酚类化合物形成的协同抗氧化也受到影响^[28-29]。因此,肠消化组的超氧阴离子自由基清除能力下降。

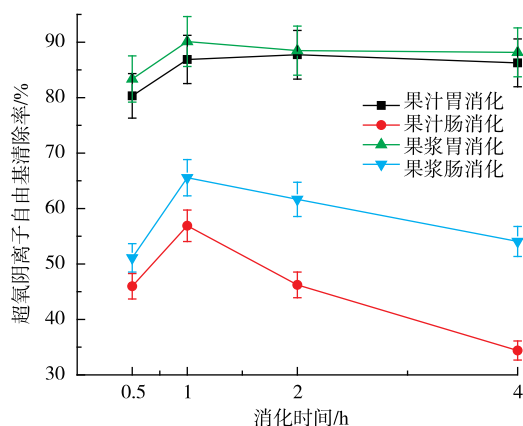


图4 果浆和果汁超氧阴离子自由基清除率

Fig. 4 Superoxide anion radical scavenging capacity of pulp and juice

果浆组和果汁组由于实验有效成分浓度不统一,没有可比性,但是图1和图2结果得出,在肠消化液中,果汁中多酚、黄酮的含量高于果浆组,但

DPPH自由基和超氧阴离子自由基清除率却得出了相反的结果,这可能是由于果汁中含有更多的游离酚,这些酚类物质之间相互作用,影响了总的自由基清除效果,而果浆保留了更多的果肉,保留了结合形式的活性成分,在肠中易分解、解离出来,从而使得果浆肠消化后自由基清除活力增加。

2.5 羟自由基清除率

机体内90%以上的自由基属于氧自由基,其中羟自由基($\cdot\text{OH}$)的化学性质最为活泼,具有极强的氧化能力,可通过电子转移、加成以及脱氢等方式氧化损伤生物体内的糖类、氨基酸、蛋白质、核酸和脂类等多种分子,与衰老、肿瘤、辐射损伤等密切相关^[9]。

图5为猕猴桃果浆和果汁分别进行不同时间的胃、肠模拟消化后,清除羟自由基的变化情况。由图5可知,模拟胃消化后,羟自由基清除率在消化1 h的样品清除率最大,而后随时间增加,果浆组清除率基本稳定,果汁组清除率降低且降幅明显。模拟肠消化,果浆组与果汁组自由基清除率略有升高,随后略微降低。总体而言,同等消化条件下,果浆组羟自由基清除率大于果汁组羟自由基清除率,和超氧阴离子自由基、DPPH自由基研究结果一致。不同的是,肠消化组羟自由基清除率大于胃消化组羟自由基清除率,而引起这一现象的原因,一方面是因为肠液消化后,多酚、黄酮释放量增加;另一方面也可能是由于模拟胃液强酸环境影响羟自由基与活性物质的电子转移,从而抑制了样品清除羟自由基的能力,封易成^[27]和从彦丽等^[30-31]也报道了相似的研究结果。

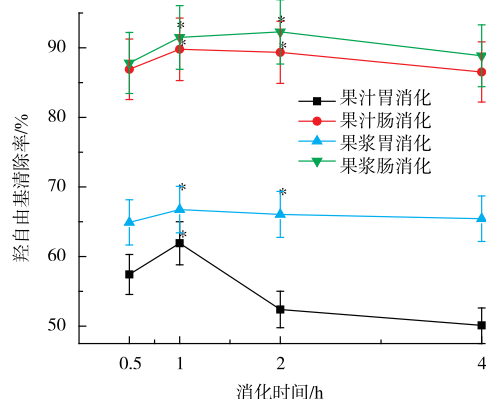


图5 果浆和果汁羟自由基清除率

Fig. 5 Hydroxyl radical scavenging capacity of pulp and juice

2.6 铁离子还原力

铁离子还原/抗氧化能力法(FRAP)和以上方法不同,它并不针对某一种自由基,而是反映样品总抗氧化活性。其检测原理是抗氧化物质将三价铁还原为二价铁,二价铁与2,4,6-三(2-吡啶基)三嗪(TPTZ)生成蓝色物质,在593 nm处有最大吸收。吸光度与抗氧化剂的还原能力呈正相关,吸光度越大表明物质具有越高的抗氧化活性^[32-33]。

猕猴桃果浆和果汁分别进行胃、肠消化阶段的模拟消化,在不同时间内铁还原力的变化如图6所示。模拟胃消化后,果浆组和果汁组样品的还原力在消化1 h时达到最大值,而消化2、3 h后还原力有所下降。模拟肠消化后,果浆组样品也呈现了与胃消化变化相似的趋势,而果汁组样品的铁还原力基本稳定。此外,同等消化条件下,果浆组铁还原力大于果汁组,这些实验结果与前述自由基清除实验结果基本一致。而肠消化组样品还原力大于胃消化组样品还原力,这个变化与羟自由基清除实验结果吻合,这也与多酚、黄酮在肠液中的高含量相吻合。虽然,王华等^[34]研究表明猕猴桃丙酮提取物的铁还原力与其清除DPPH自由基、超氧阴离子自由基能力呈现显著相关性,但本研究中铁还原力与DPPH自由基、超氧阴离子自由基能力并不相符,这个现象除了考虑不同自由基体系的局限性外,还因为王华等人研究时采用的是简单的有机溶剂提取法,并没有考虑模拟消化过程中活性物质可能发生的解离、降解、破坏等变化,因此与本研究结果并不一致。

参考文献:

- [1] 张云,刘芳,卜范文,等. 猕猴桃果实中酚类物质的分离鉴定及抗氧化活性[J]. 食品科学,2019,40(19):104-112.
- [2] SIVAKUMARAN S, HUFFMAN L, SIVAKUMARAN S, et al. The nutritional composition of Zespri® sun gold kiwifruit and Zespri® sweet green kiwifruit[J]. **Food Chemistry**, 2018, 238: 195-202.
- [3] MARI C G C, CONSUEL B, JOSE V. A free radical theory of frailty[J]. **Free Radical Biology and Medicine**, 2018, 124: 358-363.
- [4] PATRIK P, KLAUDIA J, MIRIAMA S, et al. Targeting free radicals in oxidative stress-related human diseases[J]. **Trends in Pharmacological Sciences**, 2017, 38(7): 592-607.
- [5] LIVRELLI V, GUERRA A, ETIENNE-MESMIN L. Relevance and challenges in modeling human gastric and small intestinal digestion[J]. **Trends in Biotechnology**, 2012, 30(11): 591-600.
- [6] 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.
- [7] TENORE G C, CAMPIGLA P, GIANNETTI D, et al. Simulated gastrointestinal digestion, intestinal permeation and plasma protein interaction of white, green, and black tea polyphenols[J]. **Food Chemistry**, 2015, 169(15): 320-326.
- [8] MIN F F, NIE S P, HU J L. Artificial simulated saliva, gastric and intestinal digestion of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L.[J]. **Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides**, 2013, 92(2): 1143-1150.

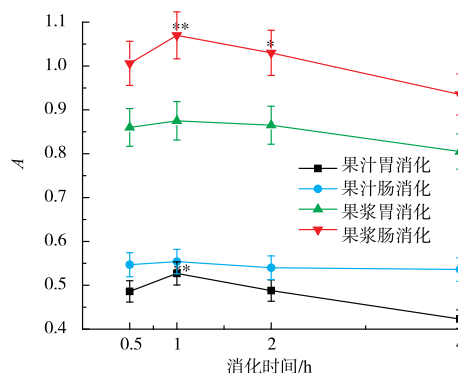


图6 果浆和果汁铁离子还原力

Fig. 6 Ferric ion reducing antioxidant power of pulp and juice

目前对物质抗氧化活性进行评估的方法非常多,但结合本研究结果和相关文献报道,发现不同的抗氧化活性评价方法对同一组分并不能得出完全一致的结论,这也提示我们研究抗氧化能力有必要选取不同方法进行综合评价。

3 结语

模拟胃液的酸性环境、模拟肠液均有利于多酚、黄酮类抗氧化物质的释放,增加猕猴桃对各类自由基的清除活性。胃肠消化1 h后多酚、黄酮含量最多,抗氧化能力也最强,但随着消化时间的延长,部分活性物质可能降解。由于猕猴桃活性组分的复杂多样性以及自由基体系的不同,模拟消化产物的自由基清除能力的变化规律与多酚、黄酮类物质的含量并不完全一致。此外,果浆和果汁的抗氧化能力虽有差异,但变化规律趋于一致。

- [9] ZHAO J M,ZHAN J C,YOU Y L,et al. Nutrient compositions and antioxidant capacity of kiwifruit (*Actinidia*) and their relationship with flesh color and commercial value[J]. **Food Chemistry**,2017,224(1):439-439.
- [10] VLASIOS G,ANDRIANI H. Dynamic changes in targeted phenolic compounds and antioxidant potency of carob fruit(*Ceratonia siliqua* L.) products during *in vitro* digestion[J]. **LWT-Food Science & Technology**,2019,101:269-275.
- [11] BOOTTEN T J,CARNACHAN S M,MISHRA S,et al. Effects of simulated digestion *in vitro* on cell wall polysaccharides from kiwifruit(*Actinidia* spp.)[J]. **Food Chemistry**,2012,133(1):132-139.
- [12] JOLANTA M,ALEKSANDRA D C,TOMASZ T,et al. Transformations of phenolic compounds in an *in vitro* model simulating the human alimentary tract[J]. **Food Technology and Biotechnology**,2009,47(4):456-463.
- [13] HENNING S M,ZHANG Y J,ONTONYANNI V G. Variability in the antioxidant activity of dietary supplements from pomegranate,milk thistle,green tea,grape seed,goji,and acai:effects of *in vitro* digestion[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2014,62(19):4313-4321.
- [14] DE P A,RAPISARDA P,BONINA F,et al. Antioxidant effectiveness as influenced by phenolic content of fresh orange juices[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,1999,47(11):4718-4723.
- [15] MOON H Y,LEE C Y,DO K,et al. Quantification of polyphenolics and their antioxidant capacity in fresh plums[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2003,51(22):6509-6515.
- [16] CROSBY K,THAIPONG K,CISNEROS Z L,et al. Comparison of ABTS,DPPH,FRAP,and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. **Journal of Food Composition and Analysis**,2006,19(6):669-675.
- [17] DAVALOS A,BARTOLOME B,GOMEZ-CORDOVES C. Extending applicability of the oxygen radical absorbance capacity (ORAC-fluorescein) assay[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2004,52(1):48-54.
- [18] WANG J,YUAN L,CHENG B,et al. Antioxidant capacity and antitumor activity of *Fructus xochiae* extracts[J]. **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**,2014,6(4):383-393.
- [19] JAYAWARDENA N,WATAWANA M I,WAISUNDARA V Y. The total antioxidant capacity,total phenolics content and starch hydrolase inhibitory activity of fruit juices following pepsin (gastric) and pancreatin (duodenal) digestion[J]. **Journal of Consumer Protection and Food Safety**,2015,10(4):349-357.
- [20] 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.
- [21] PODSEDEK A,MAJEWSKA I,REDZY尼亚 M. *In vitro* inhibitory effect on digestive enzymes and antioxidant potential of commonly consumed fruits[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2014,62(20):4610-4617.
- [22] GAYOSO L,CLAERBOUT A S,ISABEL C M,et al. Bioaccessibility of rutin,caffeic acid and rosmarinic acid:influence of the *in vitro* gastrointestinal digestion models[J]. **Journal of Functional Foods**,2016,26:428-438.
- [23] TAGLIAZUCCHI D,VERZELLONI E,BERTOLINI D,et al. *In vitro* bio-accessibility and antioxidant activity of grape polyphenols[J]. **Food Chemistry**,2010,120:599-606.
- [24] BOHN T,HOFFMANN L,BOUAYED J,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.
- [25] 孙义玄,包怡红. 艾蒿多糖抑菌活性及稳定性[J]. 食品与生物技术学报,2017,36(9):990-995.
- [26] 李傲,王谢祎,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.
- [27] 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.
- [28] 吕旭聪. 菌草灵芝多糖的分离纯化及其与茶多酚抗氧化协同作用研究:中国食品科学技术学会第十一届年会论文摘要集[C]. 杭州:中国食品科学技术学会,2014.
- [29] 孙世利,刘淑媚,赵超艺,等. 茶多酚与维生素 C/E 的协同抗氧化作用研究[J]. 广东农业科学,2013,40(1):96-98.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] KUMARI K M,PADMAJA V. Evaluation of the total antioxidant capacity of the selected plant extracts using ferric reducing antioxidant power(FRAP) assay[J]. **International Journal of Pharmacological Research**,2012,201(1):81-86.
- [33] 谢国芳,王玉波,孔德银,等. 金刺梨果实发育期间营养成分及抗氧化能力变化[J]. 食品与机械,2018,34(9):73-76.
- [34] 王华,曹婧,翟丽娟,等. 猕猴桃果肉提取物抗氧化活性研究[J]. 华北农学报,2013(2):144-149.