

南酸枣在模拟消化过程中抗氧化活性及多酚含量分析

王谢祎¹, 翟宇鑫¹, 李倩¹, 戴涛涛¹, 陈军¹, 李俶^{1,*}, 刘继延², 刘成梅¹

(1.南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047; 2.江西齐云山食品有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要: 研究南酸枣在体外模拟胃肠消化过程中酚类化合物的含量变化(没食子酸、儿茶素、表儿茶素)及其抗氧化性的变化。采用高效液相色谱法测定了3种酚类物质的含量;同时用总抗氧化能力法、2,2'-连氮基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)自由基清除法和羟自由基($\cdot\text{OH}$)清除法分别测定南酸枣消化过程中的抗氧化性。结果表明:胃肠液模拟消化后3种酚类物质含量下降,但均无显著变化。南酸枣经体外模拟消化后,其抗氧化能力逐渐下降。本实验对南酸枣消化过程中的多酚组成和抗氧化性进行研究,发现随着多酚含量的减少,抗氧化性逐渐降低。并通过比较胃肠消化过程的两个因素(化学因素、酶活性因素)的影响,发现消化酶对酚类物质含量的影响较小,而主要是化学环境影响了酚类物质含量,但是消化酶可显著提高南酸枣在消化过程中的抗氧化性。

关键词: 南酸枣; 模拟胃肠消化; 抗氧化作用; 高效液相色谱

Changes in Antioxidant Activity and Phenol Content in *Choerospondias axillaris* Fruits during Simulated Gastrointestinal Digestion

WANG Xieyi¹, ZHAI Yuxin¹, LI Qian¹, DAI Taotao¹, CHEN Jun¹, LI Ti^{1,*}, LIU Jiyan², LIU Chengmei¹

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. Jiangxi Qiyunshan Food Co. Ltd., Ganzhou 341000, China)

Abstract: The purpose of this work was to explore the phenol composition and antioxidant activity during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion of *Choerospondias axillaris* fruits. The contents of gallic acid, catechin and epicatechin in *Choerospondias axillaris* fruits were determined using high performance liquid chromatography (HPLC). Meanwhile, the antioxidant activity was evaluated by measuring total antioxidant capacity, ABTS (2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate) radical and hydroxyl radical scavenging capacity. The results showed that the contents of three phenol components decreased in spite of no statistical significance after the simulated digestion. Similarly, the antioxidant capacity declined. Further this study found that the antioxidant activity decreased with the reduction in the phenolic contents. In comparison with chemical factors, digestive enzymes had less impact on the of phenolic contents, whereas changes in the chemical environment resulted in a significant change in the phenolic contents. Digestive enzymes could significantly improve the antioxidant activity during gastrointestinal digestion.

Key words: *Choerospondias axillaris* fruit; *in vitro* simulated gastrointestinal digestion; antioxidant activity; high performance liquid chromatography (HPLC)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201611002

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2016)11-0007-05

引文格式:

王谢祎, 翟宇鑫, 李倩, 等. 南酸枣在模拟消化过程中抗氧化活性及多酚含量分析[J]. 食品科学, 2016, 37(11): 7-11.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201611002. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Xieyi, ZHAI Yuxin, LI Qian, et al. Changes in antioxidant activity and phenol content in *Choerospondias axillaris* fruits during simulated gastrointestinal digestion[J]. Food Science, 2016, 37(11): 7-11. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201611002. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2015-09-03

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(31260386); 江西省科技支撑计划项目(20121BBF60039)

作者简介: 王谢祎(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为天然产物的提取与应用。E-mail: 18566765624@163.com

*通信作者: 李俶(1971—), 女, 教授, 博士, 研究方向为天然产物的提取与应用。E-mail: liti@ncu.edu.cn

南酸枣 (*Choerospondias axillaris* (Roxb.) Burt et Hill.) 又名五眼果、广枣、人面子等, 主要分布于我国的江西、湖南、湖北、广州、贵州等地, 其干燥成熟的果实是蒙药习用药材^[1-4]。《中国药典》等记载南酸枣具有益气活血、抗心律失常、治疗心神不安等心血管疾病的功效^[5-8]。研究报道南酸枣中主要酚类化合物为没食子酸、儿茶素、表儿茶素等^[9-10], 具有良好的体外抗氧化活性, 能有效地清除和抑制氧自由基^[11-12]。然而任何一种生物活性物质在发挥其生理活性之前, 都要经过人体胃肠道的消化, 袁春龙等^[13]利用体外模拟消化实验发现葡萄籽多酚类化合物主要集中在胃部被消化。江慎华等^[14]发现人工胃液消化后, 丁香有效成分抗氧化活性得到显著提高, 人工肠液消化后, 其抗氧化活性却显著降低。目前关于南酸枣中酚类化合物在消化过程含量以及抗氧化性的变化尚未见报道。

本实验对南酸枣鲜果进行体外模拟胃肠液消化处理, 利用高效液相色谱技术, 分析体外消化前后南酸枣中几种主要酚类化合物含量的变化; 测定模拟体外消化对南酸枣抗氧化性的影响, 并对胃肠消化过程中的两个主要因素(化学因素和酶活性因素)进行对照实验, 旨在为南酸枣资源的有效利用提供实验依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

南酸枣 江西齐云山食品有限公司。

胃蛋白酶(≥ 250 U/mg)、胰蛋白酶($8\times$ USP)、牛胆酸钠, 2,2'-连氨基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS) 美国Sigma公司; 过硫酸钾、磷酸钠、钼酸铵、硫酸亚铁 天津市永大化学试剂有限公司; MD44透析袋 北京索莱宝科技有限公司; 乙腈、冰乙酸、甲醇 国药集团化学试剂公司。

T6型新世纪紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司; RE2000A型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; D-37520型冷冻离心机 德国Thermo Electron公司; SHB-3型循环水多用真空泵 郑州杜甫仪器厂; 安捷伦1260型高效液相色谱仪 美国Agilent公司; C_{18} 色谱柱 美国Waters公司。

1.2 方法

1.2.1 南酸枣体外模拟消化

1.2.1.1 鲜果的制备

将南酸枣鲜果冲洗干净, 去核取皮肉, 于 -80°C 冰箱冷冻后冻干, 粉碎机粉碎, 得到南酸枣粉末, -20°C 避光储存, 备用。

1.2.1.2 南酸枣胃肠消化^[15-16]

消化过程分为两个阶段: 模拟胃消化和肠道消化。用0.1 mol/L盐酸配制4 mg/mL胃蛋白酶溶液, 用0.1 mol/L碳酸氢钠溶液配制胰液胆汁混合液(2 mg/mL胰液, 12 mg/mL胆汁)。

胃液消化: 分别于2个250 mL具塞锥形瓶中加入50 mL 9 mg/mL氯化钠溶液, 4 mL 0.1 mol/L盐酸溶液, 8 mL活性胃蛋白酶溶液, 混合均匀, 调整pH值为2.0~2.5。各加入2.0 g鲜果, 于 37°C 、100 r/min水浴振荡1 h。一份过滤得上清液, 定容于100 mL后于 -20°C 条件下保存待分析, 另一份继续进行肠液消化。

肠液消化: 将透析袋(用9 mg/mL氯化钠溶液将透析袋清洗干净, 一端用棉线系紧, 加入8 mL 9 mg/mL氯化钠溶液, 2 mL 0.5 mol/L碳酸氢钠溶液, 系紧另一端)放入上述胃消化液中, 于 37°C 、100 r/min水浴振荡45 min, 此时, 具塞锥形瓶中pH值为6.5~7.0, 于透析袋外加入3.6 mL活性胰液-胆汁混合液, 调节pH值为7.0~7.5, 于 37°C 、100 r/min水浴振荡2 h, 取出透析袋, 将透析袋内液体定容于25 mL; 剩余液体残渣过滤得上清液, 定容于100 mL, 分别于 -20°C 条件下保存待分析。

另设不加消化酶对照组, 用于分析模拟体外消化过程中pH值等化学环境对南酸枣中酚类化合物含量和抗氧化性的影响。

1.2.2 高效液相色谱分析消化前后南酸枣酚类物质含量变化的测定

1.2.2.1 色谱条件

将1.2.1.2节中南酸枣的胃、肠消化液用0.22 μm 滤头过滤, 进样。分析消化前后南酸枣中酚类物质含量变化情况。高效液相色谱条件(表1): 高效液相色谱仪: Agilent 1260 Infinity, 液相色谱柱: C_{18} (4.6 mm $\times$ 250 mm, 5 μm), 流动相: 流动相A(乙腈:0.5%, V (乙酸): V (水)=1:1)、流动相B(0.2%乙酸水溶液), 紫外检测波长: 280 nm, 流动相流速: 0.7 mL/min, 柱温: 30°C , 进样量: 10 μL 。

表1 HPLC色谱条件
Table 1 HPLC chromatographic conditions

时间/min	A相体积分数/%	B相体积分数/%
0	10	90
10	15	85
15	15	85
20	25	75
50	55	45
55	100	0
60	90	10

1.2.2.2 标准溶液的配制

精确称取一定量表儿茶素、儿茶素、没食子酸标准

品于25 mL比色管中,加入乙醇溶解定容,放置于4℃至分析。分析前用0.22 μm滤头过滤。

1.2.2.3 标准曲线的制备

精确量取1.2.2.2节标准溶液1、2、3、4、5、6 mL纯水定容于10 mL,用0.22 μm滤头过滤,进样,以样品质量浓度为横坐标,峰面积为纵坐标,绘制标准曲线,线性关系如表2所示。

表2 标准品测定的曲线回归方程
Table 2 Linear regression equations for 3 phenolic standards

组分	回归方程	R^2	相对标准偏差/%	加样回收率/%
表儿茶素	$y=9\,474.3x-70.472$	0.999 3	0.56	98.2
儿茶素	$y=8\,622.2x-389.77$	0.998 4	1.06	99.1
没食子酸	$y=33\,262.0x-181.82$	0.999 7	0.72	97.5

1.2.3 体外模拟消化对南酸枣及其水提液抗氧化性的影响

1.2.3.1 总抗氧化能力的测定^[17-18]

空白管:在5 mL比色管中依次加入1 mL 3 mol/L硫酸溶液、1 mL 0.14 mol/L磷酸钠溶液和1 mL 0.02 mol/L钼酸铵溶液,蒸馏水定容至5 mL,摇匀,95℃恒温水浴锅中避光放置90 min,取出冷却至室温,在695 nm波长处测定吸光度,以抗坏血酸标准品质量浓度为横坐标,以吸光度为纵坐标绘制标准曲线,线性方程为 $y=0.007\,6x+0.017\,4$ ($R^2=1.000\,0$)。样品管:准确移取1 mL样品溶液于5 mL比色管中,按照以上操作进行,在695 nm波长处测定吸光度,并根据回归方程,按照公式(1)计算总抗氧化能力,结果以VC的量计,单位为mg/g。

$$\text{总抗氧化能力}/(\text{mg/g}) = \frac{\rho \times V}{m} \quad (1)$$

式中: ρ 为样品溶液中VC质量浓度/(mg/mL); V 为样品溶液总体积/mL; m 为南酸枣样品质量/g。

1.2.3.2 羟自由基($\cdot\text{OH}$)清除能力^[19-21]的测定

在5 mL比色管中加入1 mL样品溶液、1 mL 9 mmol/L硫酸亚铁、1 mL 9 mmol/L水杨酸-乙醇,混匀,加入1 mL 8.8 mmol/L双氧水,37℃恒温水浴锅中静置30 min,510 nm波长处测定吸光度 A_1 。另设样品空白组 A_0 (将样品以蒸馏水代替),反应空白组 A_{10} (蒸馏水替代双氧水)。按照公式(2)计算 $\cdot\text{OH}$ 清除率。再以VC标准品质量浓度为横坐标,以 $\cdot\text{OH}$ 清除率为纵坐标绘制标准曲线,线性方程为 $y=131.27x+8.083\,3$ ($R^2=0.994\,5$),最后 $\cdot\text{OH}$ 清除能力结果以VC的量计,单位为mg/g。

$$\cdot\text{OH清除率}/\% = \frac{A_0 - (A_1 - A_{10})}{A_{10}} \times 100 \quad (2)$$

式中: A_0 为空白组样品吸光度; A_1 为样品溶液吸光度; A_{10} 为反应空白组样品吸光度。

1.2.3.3 ABTS⁺·清除能力^[22]的测定

在具塞锥形瓶中加入1 mL 7 mmol/L ABTS和

1 mL 2.45 mmol/L过硫酸钾,混匀,避光放置过夜备用(12~16 h)。将储备液用无水乙醇稀释至其734 nm波长处吸光度为 0.70 ± 0.02 ^[23]。在5 mL比色管中加入0.2 mL样品、3.8 mL ABTS使用液,混合均匀,避光反应6 min,在734 nm波长处测定吸光度。另设样品空白组(将样品溶液以蒸馏水替代)、反应空白组(将ABTS反应液以蒸馏水替代)。按照公式(3)计算ABTS⁺·清除率。以VC标准品质量浓度为横坐标,ABTS⁺·清除率为纵坐标绘制标准曲线,线性方程为 $y=1\,254.6x+6.911\,5$ ($R^2=0.999\,7$),最后 $\cdot\text{OH}$ 清除能力结果以VC的量计,单位为mg/g。

$$\text{ABTS}^+ \cdot \text{清除率}/\% = \frac{A_0 - (A_1 - A_{10})}{A_{10}} \times 100 \quad (3)$$

式中: A_0 为空白组对样品吸光度; A_1 为样品空白组样品吸光度; A_{10} 为反应空白组样品吸光度。

1.3 数据分析

每组样品至少3次独立实验数据,结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示。多重比较、方差分析采用SPSS 17.0软件分析, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异, $P < 0.01$ 表示具有极显著性差异。

2 结果与分析

2.1 酚类物质的含量分析

南酸枣中含有多种不同酚类化合物,由于处理条件不同,一些化合物含量较低,很难全部判断其结构。故本实验结合文献报道结果^[9-10],选取了几种含量较多的酚类化合物(儿茶素、表儿茶素、没食子酸)作为代表。

表3 胃肠液消化后南酸枣鲜果中酚类单体含量变化
Table 3 Changes in individual phenolic contents in *Choerospondias axillaris* fruits after *in vitro* gastrointestinal digestion

mg/g				
组别	消化液	没食子酸	儿茶素	表儿茶素
对照组	胃液	0.50 ± 0.01^a	2.90 ± 0.51^b	1.08 ± 0.05^c
	肠液	0.55 ± 0.02^a	2.83 ± 0.32^b	1.04 ± 0.15^c
酶活性组	胃液	0.49 ± 0.01^a	2.73 ± 0.73^b	0.81 ± 0.08^c
	肠液	0.52 ± 0.02^a	2.21 ± 0.42^b	1.06 ± 0.16^c

注:同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

如表3所示,南酸枣鲜果消化液中,儿茶素含量最高,没食子酸含量最少。不同的消化阶段中没食子酸、表儿茶素和儿茶素含量无显著差异,南酸枣鲜果消化过程中没食子酸、表儿茶素和儿茶素不断释放,且在肠液中释放量较多,释放量等于损失量,故含量无明显变化。两个实验组组间也无显著差异,说明南酸枣鲜果中没食子酸、表儿茶素和儿茶素的释放主要是由酸碱消化环境引起,消化酶活性对3个酚类单体的释放无显著影响。Kahle等^[24]发现苹果中原花青素 B_2 在胃消化液以及酸

性环境中均全部降解成单体表儿茶素,在肠消化液以及碱性环境中儿茶素与表儿茶素间易发生差向异构化以及相互转化,他同样认为酸碱性环境是引起结构变化的主要原因,与本实验结果一致。

2.2 不同抗氧化方法的影响

2.2.1 总抗氧化能力

表 4 胃肠液消化后南酸枣鲜果的总抗氧化能力
Table 4 Total antioxidant capacity of *Choerospondias axillaris* fruits after simulated gastrointestinal digestion

组别	对照组	酶活性组
胃液	120.01±1.76 ^A	136.22±3.47 ^B
肠液	44.03±0.86 ^C	57.22±5.51 ^D
透析袋内	5.91±0.67 ^E	5.75±0.26 ^E

注:同行小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$);同行大写字母不同表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

如表4所示,南酸枣鲜果经人工胃肠液模拟消化后,其总抗氧化能力逐渐降低,均小于VC的总抗氧化能力,但是所测定的3种多酚单体含量并无显著变化,这可能是由南酸枣中多酚聚合物的降解所致。胃消化液中酶活性组总抗氧化能力极显著高于对照组 ($P < 0.01$);肠液消化后对照组和酶活性组总抗氧化能力降幅分别为58.4%和53.8%,酶活性组总抗氧化能力大于对照组 ($P < 0.05$),由此可见肠液消化对南酸枣的抗氧化性影响较大;透析袋内两组总抗氧化能力相当。对照组胃、肠液(透析袋外)总抗氧化能力分别为酶活性组的88.1%和76.9%。

2.2.2 •OH清除能力

表 5 胃肠液消化后南酸枣鲜果的•OH清除能力
Table 5 Hydroxyl radical scavenging activity of *Choerospondias axillaris* fruits after simulated gastrointestinal digestion

组别	对照组	酶活性组
胃液	110.34±4.66 ^a	118.30±7.62 ^b
肠液	54.10±5.77 ^c	61.87±4.55 ^d
透析袋内	7.39±0.32 ^e	7.12±0.71 ^e

如表5所示,南酸枣鲜果经人工胃肠液模拟消化后,其•OH清除能力逐渐降低,均小于VC的•OH清除能力。胃消化液中对照组•OH清除能力小于酶活性组 ($P < 0.05$),为酶活性组的93.3%,可能是由于酶活性组在消化酶的作用环境下,使南酸枣的结合多酚水解成为游离多酚,从而使对照组抗氧化能力小于酶活性组。肠液消化后对照组和酶活性组•OH清除能力仅为胃消化液中的55.7%和58.3%,说明肠部的消化是引起抗氧化下降的主要部位,透析袋外为酶活性组大于对照组 ($P < 0.05$);透析袋内两组•OH清除能力相当。对照组肠消化液•OH清除能力是酶活性组的89.1%。

2.2.3 ABTS⁺清除能力

表 6 胃肠液消化后南酸枣鲜果的ABTS⁺清除能力
Table 6 ABTS radical scavenging capacity of *Choerospondias axillaris* fruits after simulated gastrointestinal digestion

组别	对照组	酶活性组
胃液	52.10±3.71 ^b	65.77±8.59 ^a
肠液	43.62±1.55 ^d	52.76±4.57 ^c
透析袋内	4.74±0.09 ^f	6.16±0.78 ^e

如表6所示,南酸枣鲜果经人工胃肠液模拟消化后,其ABTS⁺清除能力逐渐下降,但下降幅度较小。胃液的ABTS⁺清除能力对照组小于酶活性组 ($P < 0.05$),为酶活性组的79.2%;肠液消化后对照组和酶活性组ABTS⁺清除能力均下降,由此可见,消化酶和化学酸碱环境都是引起ABTS⁺清除能力下降的原因,而本实验中的胃肠消化酶组自由基清除能力强于对照组,可能是由于胃肠消化酶水解了南酸枣中的结合多酚。而Gião等^[22]发现4种草药热水浸提液(龙牙草、覆盆子、鼠尾草和香薄荷)胃消化液中酶活性组ABTS⁺清除能力急剧减弱,对照组仅有微量减弱,认为胃蛋白酶是引起ABTS⁺清除能力减弱的主要因素。Liyana-Pathirana等^[25]发现胃酸性pH值环境可显著提高小麦ABTS⁺清除能力 ($P < 0.05$),他认为原因可能是胃液极端酸性环境引起小麦中结合态多酚水解释放。

3 结 论

南酸枣鲜果胃肠液消化后没食子酸、表儿茶素和儿茶素含量无显著差异。肠液消化可促进鲜果中没食子酸、表儿茶素和儿茶素的释放,释放量大于降解量。对照组和酶活性组之间没有显著性差异,说明酸碱消化环境是引起南酸枣鲜果中没食子酸、表儿茶素和儿茶素释放的主要因素,消化酶活性对3个酚类单体的释放无显著影响。

南酸枣鲜果经人工胃肠液模拟消化后,其总抗氧化能力、•OH清除能力、ABTS⁺清除能力均逐渐下降。胃消化液中总抗氧化能力、•OH清除能力和ABTS⁺清除能力均为酶活性组大于对照组 ($P < 0.01$);肠液消化后均有显著下降,透析袋外为酶活性组大于对照组 ($P < 0.05$);透析袋内两个实验组总抗氧化能力、•OH清除能力相当,ABTS⁺清除能力为酶活性组大于对照组 ($P < 0.01$)。从对照组和酶活性组的组间抗氧化显著性差异来看,化学环境对南酸枣消化过程中抗氧化的影响较小,消化酶的存在可显著提高南酸枣鲜果抗氧化能力,这可能是由于消化酶可以将一些结合多酚水解出来,从而使其抗氧化性提高。

参考文献:

- [1] 熊冬生, 浦跃武. 南酸枣植物在药物方面的研究概况及其应用前景[J]. 广东药学, 2000, 10(5): 8-10. DOI:10.3969/j.issn.1674-229X.2000.05.004.
- [2] 刘勇. 南酸枣的利用价值[J]. 生物学通报, 1996, 31(2): 48.
- [3] 汤喜兰, 刘建勋, 李磊, 等. 广枣模拟总有机酸对心肌缺血再灌注损伤的保护作用[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(4): 168-172.
- [4] 包俊萍, 金明, 杨雨民, 等. 广枣总黄酮对体外培养大鼠心脏成纤维细胞 I, III型胶原mRNA及蛋白表达的影响[J]. 药学报, 2014, 49(1): 136-141.
- [5] 黎明. 蒙药广枣七味丸的药理学进展[J]. 北方药学, 2011, 8(4): 70-71.
- [6] 邢慧慧, 金明, 杨雨民, 等. 广枣总黄酮对体外培养大鼠心脏成纤维细胞周期影响[J]. 辽宁中医药大学学报, 2014(4): 34-37. DOI:10.13194/j.issn.1673-842x.2014.04.011.
- [7] 刘婷, 朱德礼, 舒亮, 等. 广枣总黄酮对血管紧张素 II 所致大鼠心肌纤维化的影响[J]. 中国民族医药杂志, 2014, 20(12): 56-58. DOI:10.3969/j.issn.1006-6810.2014.12.027.
- [8] 贾磊, 金明, 杨雨民, 等. 广枣总黄酮抑制AngII诱导大鼠心脏成纤维细胞的增殖及机制[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(6): 1308-1311.
- [9] 唐丽, 李国玉, 杨炳友, 等. 广枣化学成分的研究[J]. 中草药, 2009, 40(4): 541-543. DOI:10.3321/j.issn:0253-2670.2009.04.013.
- [10] 智慧, 白玉霞. HPLC法测定蒙药广枣中没食子酸含量[J]. 中国民族医药杂志, 2009, 15(1): 40-41. DOI:10.3969/j.issn.1006-6810.2009.01.027.
- [11] 包保全, 张昕原, 乌日娜, 等. 广枣总黄酮抗氧化作用的实验研究[J]. 中药药理与临床, 2001, 17(2): 8-10. DOI:10.3969/j.issn.1001-859X.2001.02.005.
- [12] WANG H, GAO X D, ZHOU G C, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of aqueous extract from *Choerospondias axillaris* fruit[J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 888-895. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.05.068.
- [13] 袁春龙, 李华, 张予林, 等. 葡萄籽在模拟人体肠胃环境中的吸收状况[J]. 中国食品学报, 2011, 11(1): 14-19.
- [14] 江慎华, 蔡志鹏, 廖亮, 等. 丁香抗氧化活性物质提取及人工胃肠液对其活性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 149-155. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.028.
- [15] JAOUAD B, LUCIEN H, TORSTEN B. Total phenolics, flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity following simulated gastrointestinal digestion and dialysis of apple varieties: bioaccessibility and potential uptake[J]. Food Chemistry, 2011, 128(1): 14-21. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.02.052.
- [16] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.10.030.
- [17] PRIETO P, PINEDA M, AGUILAR M. Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: specific application to the determination of vitamin E[J]. Analytical Biochemistry, 1999, 269(2): 337-341. DOI:10.1006/abio.1999.4019.
- [18] 金鸣, 蔡亚欣, 李金荣, 等. 邻二氮菲-Fe²⁺氧化法测定H₂O₂/Fe²⁺产生的羟自由基[J]. 生物化学与生物物理进展, 1996, 23(6): 553-555.
- [19] 高愿军, 高雪丽, 司俊娜. 桦褐孔菌多酚清除自由基作用的稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2009(10): 107-109.
- [20] SMIRNOFF N, CUMBES Q J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes[J]. Phytochemistry, 1989, 28(4): 1057-1060. DOI:10.1016/0031-9422(89)80182-7.
- [21] JAYAPRAKASHA G K, SELVI T, SAKARIAH K.K. Antibacterial and antioxidant activities of grape (*Vitis vinifera*) seed extracts[J]. Food Research International, 2003, 36(2): 117-122. DOI:10.1016/S0963-9969(02)00116-3.
- [22] GIÃO M S, GOMES S, MADUREIRA A R, et al. Effect of *in vitro* digestion upon the antioxidant capacity of aqueous extracts of *Agrimonia eupatoria*, *Rubus idaeus*, *Salvia* sp. and *Satureja montana*[J]. Food Chemistry, 2012, 131(3): 761-767. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.09.030.
- [23] PACIFICO S, GALASSO S, PICCOLELLA S, et al. Seasonal variation in phenolic composition and antioxidant and anti-inflammatory activities of *Calamintha nepeta* (L.) Savi[J]. Food Research International, 2015, 69: 121-132. DOI:10.1016/j.foodres.2014.12.019.
- [24] KAHLE K, KEMPF M, SCHREIER P, et al. Intestinal transit and systemic metabolism of apple polyphenols[J]. European Journal of Nutrition, 2011, 50(7): 507-522. DOI:10.1007/s00394-010-0157-0.
- [25] LIYANA-PATHIRANA C M, SHAHIDI F. Antioxidant activity of commercial soft and hard wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by gastric pH conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(7): 2433-2440. DOI:10.1021/jf049320i.