

加工方式对豆芋有效组分及抗氧化、 α -葡萄糖苷酶抑制活性的影响

邓珂, 杨良缘, 胡钰, 许光治, 王艳, 张有做, 倪勤学*

(浙江农林大学食品与健康学院 杭州 311300)

摘要 以豆芋为研究对象,采用体外模拟消化法评估加工方式(去皮、带皮、挤压膨化、发酵、炒制处理)对总酚、总糖、总黄酮、异黄酮、生物碱含量及抗氧化(DPPH、ABTS⁺清除及 FRAP 体系)、 α -葡萄糖苷酶抑制的影响。相比加工对照组,发酵处理使豆芋总酚、异黄酮、生物碱含量分别增加 73.46%、42.02%、56.61%,挤压膨化处理使总黄酮含量增加 19.68%,炒制处理使总糖含量增加 31.19%。其中,DPPH、ABTS⁺、FRAP 代表的抗氧化能力分别增加 6.81%~19.77%、21.02%~41.96%、3.24%~35.99%;同时发酵处理对 α -葡萄糖苷酶抑制率增加 33.6%。这 5 种加工方式中,发酵是保留豆芋中总酚、异黄酮、生物碱的最适加工方法,挤压膨化是保留总黄酮最适加工方法,炒制是保留总糖最适加工方法。

关键词 豆芋;加工方式;体外模拟消化;有效组分含量;抗氧化; α -葡萄糖苷酶抑制

文章编号 1009-7848(2022)10-0252-08 **DOI**: 10.16429/j.1009-7848.2022.10.027

豆芋(*Apios americana* Medik)是一种起源于北美洲东部地区的可食用性豆科土圜儿属植物^[1],也是几千年前印地安人的主要食物,又称之为“印第安马铃薯”。豆芋块茎富含蛋白质、亚油酸、矿物质等多组营养素^[2],同时富含异黄酮、多酚、皂苷、生物碱、抗性淀粉等生理活性物质^[3-8],是一种营养丰富的健康食品。国外研究表明,豆芋块茎具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、抗病毒的功效,特别对代谢紊乱造成的高血糖、高血压、高血脂、肥胖等病症具有明显的防治作用^[9]。

食物经加工后,物理特性、营养特性均会发生改变^[9]。如:豆芋块茎中总酚、总黄酮、总糖、异黄酮和生物碱等活性成分会随着加工温度等条件的变化而变化,然而,至今国内外未有关于加工方式对豆芋块茎中有效组分含量及抗氧化、 α -葡萄糖苷酶的影响,且有效组分进入消化系统后,其稳定性和抗氧化活性易受环境中的 pH 值、温度、酶和其它相关因素的影响,导致有效组分的吸收释放各不相同^[10]。因体内环境复杂,难以控制,故引入体外模拟消化这一方法,体外模拟人体消化道的 pH 值、温度、酶等易控制的条件下,使其尽可能接近体内环境,该方法快速、安全、简单且重现性好,已广泛应用于研究各种活性物质在消化过程中的变

化^[11]。Huang 等^[12]通过模拟胃肠消化,检测 7 种海藻酚类含量和抗氧化的变化,结果发现海藻中游离酚类含量在肠消化中显著增加,因酚类物质增加而抗氧化明显增强;Liang 等^[13]发现模拟消化后桑树提取物清除自由基的能力显著增加,具有良好的抗氧化活性。

因通常情况下,在食用马铃薯、葛根、山药等块根时均要做去表皮处理,故选用去皮豆芋作对照组,采用带皮、发酵、膨化、炒制等加工方法处理豆芋块茎,借助体外模拟消化法评估豆芋块茎中总酚、总黄酮、总糖、异黄酮、生物碱含量及抗氧化(DPPH、ABTS⁺、FRAP)、 α -葡萄糖苷酶抑制活性的变化,为最大限度地保留豆芋的营养成分,将其作为新型功能性食品原料提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

豆芋 7 月采自浙江农林大学平山基地。

福林酚试剂、 α -淀粉酶(α -Amylase)、胃蛋白酶(Pepsin)、胰酶(Pancreatin)、 α -葡萄糖苷酶, Sigma 公司;染料木苷、盐酸小檗碱、芦丁、没食子酸、葡萄糖,上海源叶生物科技有限公司;抗坏血酸、硝酸铝,国药集团化学试剂有限公司;1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2, 2'-联氮-双-3-以及苯并噻唑林-6-磺酸(ABTS),阿拉丁化学试剂有限公司;对硝基苯基- β -D-吡喃葡萄糖苷(PNPG),上海惠诚生物科技有限公司;其余试剂

收稿日期: 2021-10-05

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY19C200016)

作者简介: 邓珂(1995—),女,硕士生

通信作者: 倪勤学 E-mail: niqinxue@zafu.edu.cn

均为分析纯级。

1.2 仪器与设备

UV-5500 紫外-可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱,沙鹰科学仪器(上海)有限公司;BSA224S 电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;PHS-3F 实验室 pH 计,上海精密科学仪器有限公司;摇床,华利达实验设备有限公司;YB-1000A 高速多功能粉碎机,永康速锋工贸有限公司;SLG65-III 同向旋转双螺杆挤压机,济南赛百诺科技开发有限公司;Velocity18R 台式冷冻离心机,Dynamica 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 处理方法

1) 对照组(去皮) 新鲜的豆芽块茎洗净,除去表皮后切成约 20 mm 厚的薄片,于 60 °C 烘箱干燥,全部干燥后冷却,经多功能粉碎机粉碎,过 80 目筛,备用。

2) 带皮组 新鲜的豆芽块茎洗净、晾干,切成约 20 mm 厚的薄片,60 °C 烘箱干燥,全部干燥后冷却,经多功能粉碎机粉碎,过 80 目筛,备用。

3) 炒制组 将“去皮豆芽”于 95 °C 炒锅中不断翻炒,至锅内产生焙烤的豆芽香味,原料颜色变化至黄色,再炒制 5 min^[4],冷却后密封,备用。

4) 挤压膨化组 将“去皮豆芽”加入螺旋双杆挤出机中,通过喷淋和搅拌的方式调节水分,使原料含水率约 20%,设置挤压机前、中、后段温度分别为 50,125,135 °C,螺杆旋转速率为 28 Hz,结束后于 60 °C 烘箱干燥,冷却后密封,备用^[5]。

5) 发酵组 将“去皮豆芽”与酵母水混合,搅拌至黏稠状,揉成直径约 5 cm 的实心团,于 37 °C、湿度为 70% 的恒温发酵箱中发酵 2 h,60 °C 烘箱干燥,多次粉碎后过 80 目筛,备用。

1.3.2 体外模拟消化处理 体外模拟消化液的配制:参考龚凌霄^[6]的方法,略有改动,具体如下:

1) 人工唾液 分别称取 Na_2HPO_4 2.38 g、 KH_2PO_4 0.19 g、 NaCl 8.00 g,加水溶解,调 pH 值至 6.75,加入 α -淀粉酶(1.30 g)。

2) 人工胃液 称取 NaCl 2.0 g、胃蛋白酶 3.2 g,溶于含 7.0 mL HCl 溶液的 1 000 mL 水溶液中(pH \approx 1.2)。

3) 人工肠液 称取 KH_2PO_4 6.8 g 溶于 250 mL 水中,加入 77 mL 0.1 mol/L NaOH 和 500 mL 水,混匀,加入 10.0 g 胰酶,调 pH 值至 6.8 \pm 0.1,加水稀释至 1 000 mL。

体外模拟消化过程:分别取 5.0 g 不同加工处理的豆芽样品,于 37 °C 水浴孵育,模拟消化从唾液开始,加入 2.5 mL 人工唾液,调 pH 值至 7.0,37 °C 恒温水浴振荡 10 min;加入 50 mL 人工胃液,调 pH 值至 2.5,37 °C 恒温水浴振荡 2 h,模拟胃消化阶段;加入 50 mL 人工肠液,调 pH 值至 7.5,37 °C 恒温水浴振荡 2 h,模拟小肠消化阶段。冰浴中放置 10 min 终止反应。将反应液于 10 000 r/min、4 °C 离心 30 min,取上清液供分析用。

对照组:分别取 5.0 g 不同加工处理的豆芽样品,步骤同上,添加消化液的地方均改为加盐水,将得到的反应液于 10 000 r/min、4 °C 离心 30 min,取上清液供分析用。

1.4 豆芽主要组分测定方法

1) 总酚含量的测定 参考 Singleton 等^[7]略有改动。称取 25.0 mg 没食子酸,加水定容至 100 mL,分别取 0.05,0.10,0.20,0.40,0.80,1.20 mL,用蒸馏水稀释至 10 mL,加入 0.5 mL 福林酚试剂和 2 mL 20% Na_2CO_3 溶液,40 °C 水浴加热 30 min,冷却后稀释至 25 mL。以不含没食子酸为空白对照,于波长 760 nm 处测定吸光度值,以吸光度值为纵坐标,没食子酸浓度为横坐标绘制标准曲线。

将 1.3.2 节所得上清液重复上述操作,带入标准曲线公式计算总酚含量。

2) 生物碱含量的测定 参考 Fazel 等^[8]的方法并略有改动。称取 2.0 mg 盐酸小檗碱,乙醇定容至 100 mL,吸取 1.0,2.0,3.0,4.0,6.0 mL,乙醇定容至 10 mL,以乙醇试剂为空白,于波长 350 nm 下测吸光度值,以盐酸小檗碱浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标绘制标准曲线。

将 1.3.2 节体外模拟消化和对照组所得上清液重复上述操作,带入标准曲线公式计算生物碱含量。

3) 总黄酮含量的测定 采用硝酸-亚硝酸钠比色法,参考郑媛媛等^[9]的方法并稍作修改。称取 15.0 mg 芦丁,用水定容 100 mL,分别取 0.5,1.0,2.0,3.0,4.0 mL,定容至 5 mL,加 5% 亚硝酸钠溶液

(0.3 mL),混匀静置 5 min,加入 10%硝酸铝溶液(0.3 mL),混匀静置 6 min,加 2 mL 1.0 mol/L 氢氧化钠溶液,用水定容 10 mL,静置 10 min。以不含芦丁的溶液为空白对照,于波长 510 nm 处测定吸光值,以吸光值为纵坐标,芦丁浓度为横坐标绘制标准曲线。

将 2.2 节所得上清液重复上述操作,带入标准曲线公式计算总黄酮含量。

4) 异黄酮含量的测定 采用紫外(UV)比色法测定异黄酮含量,参考 Shinde 等^[20]稍加改动。以染料木苷为对照品,称取 6.0 mg 染料木苷,用乙醇溶解并定容 25 mL。分别移取 0.1,0.2,0.4,0.6,0.8 mL,稀释至 10 mL,于波长 268 nm 处测定吸光度,以染料木苷浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标绘制标准曲线。

将 2.2 节所得上清液重复上述操作,带入标准曲线公式计算总异黄酮含量。

5) 总糖含量的测定 参考 Tsukakoshi 等^[21]的苯酚硫酸法并略有改动。取 8.0 mg 葡萄糖溶于 100 mL 水中,分别吸取葡萄糖标准溶液 0,0.2,0.4,0.6,1.0,1.4,1.6,1.8 mL,加水补至 2.0 mL,反应 20 min,于波长 490 nm 处测吸光值。以葡萄糖浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标绘制标准曲线。

将 2.2 节所得上清液重复上述操作,带入标准曲线公式计算总糖含量。

1.5 豆芽抗氧化的测定方法

1.5.1 DPPH 自由基清除率的测定 参考 Hou 等^[22]的方法并略加改动。

试验组:将 2 mL 样品与等体积的 0.1 mmol/L DPPH 混合,避光反应 30 min。对照组:2 mL 样品与等体积乙醇混合避光反应 30 min。空白对照组:2 mL 乙醇与等体积 0.1 mmol/L DPPH 混合,避光反应 30 min。以 L-抗坏血酸为阳性对照,于波长 517 nm 处测定吸光度值。按公式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中, A_0 ——空白对照组吸光度; A_i ——试验组吸光度; A_j ——对照组吸光度。

1.5.2 ABTS⁺自由基清除率的测定 参考 Hou 等^[22]的方法并略有改动。试验组:将 0.1 mL 豆芽样

品与 3.9 mL ABTS⁺工作液混合,避光静置反应 7 min。对照组:将 0.1 mL 样品与 3.9 mL 乙醇混合,避光静置反应 7 min。空白对照组:将 0.1 mL 乙醇与 3.9 mL ABTS⁺工作液混合,避光静置 7 min。以 L-抗坏血酸为阳性对照,于波长 734 nm 处测定吸光度值,按照公式(2)计算 ABTS⁺清除率:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中, A_0 ——空白对照组吸光度; A_i ——试验组吸光度; A_j ——对照组吸光度。

1.5.3 铁离子还原力测定 (FRAP 法) 参考赵建等^[23]的方法并略有改动。FRAP 工作液的配制:由 300 mmol/L 乙酸钠溶液、10 mmol/L TPTZ 溶液和 20 mmol/L 三氯化铁溶液按体积比 10:1:1 配制而成,现用现配。

标准曲线制作:分别取 0.07,0.14,0.28,0.42,0.56,0.70,0.84 mmol/L 硫酸亚铁(各 0.1 mL),加入 0.3 mL 水和 3.0 mL FRAP 工作液,充分混匀,室温避光反应 50 min,以水作空白对照,于波长 593 nm 处测定吸光度值,以硫酸亚铁浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标制作标准曲线。

样品铁离子还原力测定:取 0.4 mL 供试品溶液,加入 3.0 mL FRAP 工作液,步骤同标准曲线制作,将得到的吸光度值带入标准曲线求等体积情况下对铁离子的还原能力。

1.5.4 α -葡萄糖苷酶抑制率的测定 参考王静等^[24]的方法并加以改进。试验组:将 100 μ L 样品溶液与等体积 0.01 mg/mL α -葡萄糖苷酶混合,37 $^{\circ}$ C 反应 10 min,加入 100 μ L 对硝基苯基- α -D-吡喃葡萄糖(2.5 mmol/L PNPG)溶液,37 $^{\circ}$ C 反应 10 min,加入 5 mL 0.1 mmol/L NaCO₂ 溶液终止反应,于波长 405 nm 处测定吸光度值。空白组:用去离子水代替样品,步骤同试验组。对照组:缓冲液代替酶,步骤同试验组。按照公式(3)计算抑制率:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%) = \frac{1 - (A_{\text{样品}} - A_{\text{空白}})}{A_{\text{对照}}} \times 100 \quad (3)$$

式中, $A_{\text{样品}}$ ——试验组吸光度; $A_{\text{对照}}$ ——对照组吸光度; $A_{\text{空白}}$ ——空白对照组吸光度。

1.6 数据处理

试验数据以平均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用

SPSS 25.0 软件分析数据。

2 结果与分析

2.1 加工方式对豆芽有效组分含量的影响

加工方式对豆芽总酚、总黄酮、总糖、异黄酮、生物碱含量的影响如表 1 所示。模拟消化后,豆芽中总酚、总黄酮、总糖、异黄酮和生物碱含量均显著高于对照组,且生物碱增幅最大,增加 83.22%~148.83%,说明模拟消化可促进总酚、总黄酮、总糖、异黄酮和生物碱的释放,并且生物碱的促进释放作用最大。因模拟消化后总酚、总黄酮、总糖、异黄酮、生物碱含量显著增加,且更接近人体利用度,故采用体外模拟消化法评估加工方式对有效组分含量的影响。

模拟消化后,总酚含量由大到小的加工方式是发酵>带皮>挤压膨化>炒制>对照组,分别增加

73.46%,34.13%,6.32%,3.85%,其中发酵和带皮处理是保留总酚最好的加工方式;挤压膨化、带皮处理使总黄酮含量分别增加 19.68%,11.82%。挤压膨化处理时,高温、高压作用使结合态黄酮、酚类物质转变为游离态被释放出来,从而使总黄酮、总酚含量升高^[25]。总糖含量由大到小的加工方式是炒制>挤压膨化>发酵>带皮>加工对照组,分别增加 31.19%,13.28%,10.62%,2.37%。炒制处理时高温等环境条件使部分淀粉转化为糖类,从而使总糖含量增加。发酵处理的样品中异黄酮含量增加 42.02%,可见发酵处理能很好地促进异黄酮物质的溶出,带皮处理也使异黄酮含量增加 9.52%。生物碱含量由大到小的加工方式是发酵>挤压膨化>带皮>炒制>对照组,其中发酵、挤压膨化处理生物碱含量增幅最大,分别增加 56.61%和 38.91%。

表 1 加工方式对豆芽有效组分含量的影响

Table 1 Effects of processing method on contents of effective components of *Apios americana* Medik

加工方式	总酚/%		总黄酮/%		总糖/%		异黄酮/%		生物碱/%	
	对照组	模拟消化组	对照组	模拟消化组	对照组	模拟消化组	对照组	模拟消化组	对照组	模拟消化组
去皮	1.54 ± 0.03 ^b	2.01 ± 0.03 ^b	2.67 ± 0.10 ^a	3.88 ± 0.05 ^b	15.08 ± 0.25 ^b	17.95 ± 0.04 ^a	2.57 ± 0.31 ^a	3.91 ± 0.21 ^{ab}	8.34 ± 0.76 ^a	18.27 ± 1.97 ^b
	1.88 ± 0.04 ^a	2.70 ± 0.03 ^a	2.91 ± 0.16 ^{ab}	4.34 ± 0.03 ^c	15.40 ± 0.25 ^b	18.37 ± 0.04 ^b	3.34 ± 0.24 ^b	3.57 ± 0.27 ^a	9.82 ± 0.73 ^a	15.65 ± 1.04 ^a
膨化	1.74 ± 0.03 ^c	2.14 ± 0.05 ^a	3.23 ± 0.19 ^{bc}	4.64 ± 0.05 ^d	16.25 ± 0.37 ^c	20.33 ± 0.02 ^d	2.32 ± 0.21 ^a	3.32 ± 0.19 ^a	8.76 ± 0.84 ^a	21.74 ± 2.38 ^b
	2.57 ± 0.03 ^d	3.49 ± 0.05 ^c	2.52 ± 0.10 ^a	3.07 ± 0.02 ^a	16.85 ± 0.19 ^a	19.85 ± 0.03 ^c	3.46 ± 0.25 ^b	5.07 ± 0.23 ^c	9.85 ± 0.91 ^{ab}	24.51 ± 2.09 ^{bc}
炒制	1.36 ± 0.07 ^e	2.09 ± 0.25 ^a	2.60 ± 0.19 ^a	3.84 ± 0.04 ^b	15.48 ± 0.24 ^b	23.55 ± 0.03 ^e	2.73 ± 0.25 ^a	3.48 ± 0.17 ^a	8.94 ± 0.61 ^a	16.38 ± 1.88 ^a

注:同一列不同字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 加工方式对豆芽抗氧化活性的影响

加工方式对豆芽抗氧化能力的影响如图 1 所示。模拟消化后,去皮、带皮、挤压膨化、发酵、炒制处理清除 DPPH、ABTS⁺自由基和 FRAP 的能力均显著高于对照组。最终采用体外模拟消化法评估加工方式对豆芽抗氧化的影响。

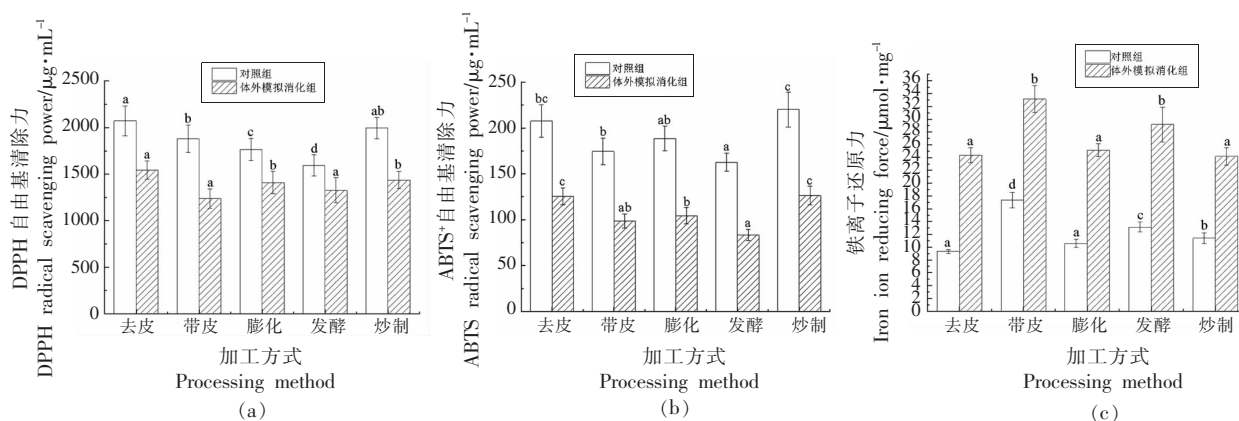
从图 1b 可知,清除 ABTS⁺自由基的能力在模拟消化后显著高于对照组,其中,发酵处理清除效果最显著,较对照组增加 41.96%,这可能是因为

发酵处理后总酚、总黄酮、异黄酮、生物碱等活性物质含量增加,起抗氧化作用的物质更多,所以清除 ABTS⁺自由基的能力强,带皮、挤压膨化处理分别使清除 ABTS⁺自由基能力增加 26.76%和 21.02%。

清除 DPPH 自由基能力由强到弱的加工方式是带皮>发酵>挤压膨化>炒制>对照组,较对照组分别增加 19.77%,13.94%,8.57%,6.81%;铁离子还原力的增加趋势基本与 DPPH 相符,由强到弱

依次是带皮>发酵>挤压膨化>对照组,分别增加35.99%,19.70%,3.24%。其中,DPPH和FRAP代

表的抗氧化能力,均是带皮处理最显著,说明豆芋块茎的表皮中也含有抗氧化活性物质。



注:组间不同字母表示具有显著性差异, $P<0.05$ 。

图1 不同加工方式对抗氧化能力的影响

Fig.1 Effects of different processing methods on oxidation resistance

2.3 加工方式对 α -葡萄糖苷酶抑制性影响

加工方式对 α -葡萄糖苷酶活性抑制的影响如表2所示。由于对照组抑制 α -葡萄糖苷酶活性所需浓度太高,在有限浓度内未检出。模拟消化后,发酵处理对 α -葡萄糖苷酶的半抑制质量浓度为 $621.31\ \mu\text{g}/\text{mL}$,抑制能力增加33.6%,这可能因为发酵处理使活性物质溶出更多,对 α -葡萄糖苷酶抑制率大。

2.4 相关性分析

总酚、总黄酮、总糖、异黄酮、生物碱含量与抗氧化指标(清除DPPH、ABTS⁺自由基、FRAP)之间的相关性分析见表3。总酚含量与DPPH、ABTS⁺自由基清除率与有效组分之间的相关性趋势一致,相关性由大到小依次是总酚>生物碱>异黄酮>总糖>总黄酮,其中总酚含量与ABTS⁺自由基清除率之间的相关性为0.895,这与发酵处理组总酚含量最高、清除ABTS⁺自由基能力最强的事实相符合。FRAP与异黄酮含量相关性最大,相关系数为0.722,说明异黄酮含量对铁离子还原能力起主要作用。

表2 加工方式对 α -葡萄糖苷酶抑制活性的影响

Table 2 Effects of processing methods on α -glucosidase on inhibitory activity

样品 (Sample)	α -葡萄糖苷酶 $\text{IC}_{50}/\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	对照组 (Control)	体外模拟消化组 (In vitro simulated digestion)
去皮 (Peeled)	-	935.61 ± 103.32^c
带皮 (With skin)	-	-
膨化 (Expanded)	-	-
发酵 (Fermented)	-	621.31 ± 89.37^b
炒制 (Fried)	-	-
阿卡波糖 (Acarbose)		9.97 ± 0.79^a

注:同一列不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

表3 有效组分含量与抗氧化指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of effective component content and antioxidant index

有效组分 (Effective component)	抗氧化 (Antioxidant)		
	DPPH	ABTS ⁺	FRAP
总酚 (Total phenol)	0.674	0.895	0.67
总黄酮 (Total flavonoid)	0.023	0.28	0.032
总糖 (Total sugar)	0.118	0.293	0.452
异黄酮 (Isoflavone)	0.447	0.484	0.722
生物碱 (Alkaloid)	0.472	0.89	0.315

3 讨论

采用体外模拟胃、肠消化评估加工方式对豆芋块茎中总酚、总黄酮、异黄酮、总糖、生物碱含量

及抗氧化(DPPH、ABTS⁺清除及FRAP体系)、 α -葡萄糖苷酶抑制活性的影响,结果表明,模拟消化后有效组分含量、抗氧化能力、对 α -葡萄糖苷酶活

性抑制率均显著增加。其中,FRAP与DPPH代表的抗氧化能力趋势接近,均是带皮处理抗氧化能力最强,较对照组分别增加19.77%,35.99%,抗氧化能力由强到弱的加工方式是带皮>发酵>挤压膨化>对照组;发酵处理组清除ABTS⁺自由基、 α -葡萄糖苷酶抑制效果最显著,较对照组分别增加41.96%,33.6%。

发酵处理是保留豆芋总酚、异黄酮、生物碱的最适加工方法,较对照组分别增加73.46%,42.02%,56.61%。挤压膨化处理是保留总黄酮的最适加工方法,含量增加19.68%。炒制处理是保留总糖的最适加工方法,含量增加31.19%。

有效组分含量与DPPH、ABTS⁺、FRAP之间呈正相关,其中总酚含量与DPPH、ABTS⁺自由基清除率之间的相关性最大,相关系数分别为0.674,0.895,FRAP与异黄酮含量相关性最大,相关系数为0.722,说明清除DPPH、ABTS⁺自由基起主要作用的物质是总酚,铁离子还原力的决定物质是异黄酮。

参 考 文 献

- [1] CARLISI J, WOLLARD D. History, culture and nutrition of *Apios americana*[J]. Journal of Nutraceuticals, Functional & Medical Foods, 2005, 4(3/4): 85-92.
- [2] ZHANG Y, ZHOU C, TANG S, et al. Effect of AATI, a Bowman-Birk type inhibitor from *Apios americana*, on proliferation of cancer cell lines[J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 909-915.
- [3] OKUBO K, YOSHIKIKI Y, OKUDA K, et al. DDMP-conjugated saponin (soyasaponin β g) isolated from American Groundnut (*Apios americana*) [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 1994, 58(12): 2248-2250.
- [4] NARA K, NIHEI K, OGASAWARA Y, et al. Novel isoflavone diglycoside in groundnut (*Apios americana* Medik) [J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 703-710.
- [5] YANGCHEN H, BELAMKR V, CANNON S B, et al. Characterization and development mechanism of *Apios americana* tuber starch [J]. Carbohydrate Polymers Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2016, 151: 198-205.
- [6] KANRTA H, KODA M, SAITO S, et al. Biological activities of unique isoflavones prepared from *Apios americana* Medik[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2016, 80(4): 774-778.
- [7] KIM J H, KIM H Y, KANG S Y, et al. Chemical constituents from *Apios americana* and their inhibitory activity on tyrosinase[J]. Molecules, 2018, 23(2): 232-243.
- [8] KENMOCHI E, KANIR S R, OGAWA T, et al. Isolation and biochemical characterization of *Apios tuber* lectin[J]. Molecules, 2015, 20(1): 987-1002.
- [9] 詹珂. 加工方法对于食物性能的影响浅析[C]//第十三届中国西部营养与健康高峰论坛论文集[C]. 成都: 四川省营养学会, 2018.
ZHAN K. Analysis of the influence of processing methods on food performance[C]// Proceedings of the 13th Western China Nutrition and Health Summit Forum. Chengdu: Sichuan Nutrition Society, 2018: 1.
- [10] BOUAYED J, HOFFMANN L, BOHN T. Total phenolics, flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity following simulated gastro-intestinal digestion and dialysis of apple varieties: Bioaccessibility and potential uptake[J]. Food Chemistry, 2011, 128(1): 14-21.
- [11] 王耀红, 王蕾, 赵朋, 等. 不同加工方式对紫色马铃薯中酚类物质的影响 [J]. 食品科学, 2017, 38(7): 115-121.
WANG Y H, WANG L, ZHAO P, et al. Effects of different processing methods on phenolic compounds in purple potato[J]. Food Science, 2017, 38(7): 115-121.
- [12] HUANG Z, CHEN Q, HU K, et al. Effects of *in vitro* simulated digestion on the free and bound phenolic content and antioxidant activity of seven species of seaweeds[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(5): 2365-2374.
- [13] LIANG L, WU X, ZHAO T, et al. *In vitro* bioaccessibility and antioxidant activity of anthocyanins from mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb.) following simulated gastro-intestinal digestion [J]. Food Research International, 2012, 46(1): 76-82.
- [14] 郭项雨, 任清, 张晓. 传统高温炒制工艺对裸燕麦

- 淀粉品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 52-56.
- GUO X Y, REN Q, ZHANG X. Effects of traditional high temperature frying process on the quality of naked oat starch[J]. Food Science, 2012, 33(11): 52-56.
- [15] 刘磊, 冉玉兵, 韩素云, 等. 不同加工方式对米糠粉食品配理化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(3): 222-228, 209.
- LIU L, RAN Y B, HAN S Y, et al. Effects of different processing methods on physicochemical properties of rice bran powder[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(3): 222-228, 209.
- [16] 龚凌霄. 青稞全谷物及其防治代谢综合征的作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- GONG L X. Study on whole grain of highland barley and its effect on prevention and treatment of metabolic syndrome[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [17] SINGLETON V, ROSSI J A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1964, 16(3): 144-158.
- [18] FAZEL S, HAMIDREZA M, ROUHOLLAH G, et al. Spectrophotometric determination of total alkaloids in some Iranian medicinal plants[J]. Journal of Applied Horticulture, 2010, 12(1): 69-70.
- [19] 郑媛媛, 李辰, 封士兰, 等. 油橄榄叶中总黄酮含量测定方法探讨[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 547-550.
- ZHENG Y Y, LI C, FENG S L, et al. Determination of total flavonoids in olive leaves[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 547-550.
- [20] SHINDE A N, MALPATHAK N, FULZELE D P. Determination of isoflavone content and antioxidant activity in *Psoralea corylifolia* L. callus cultures[J]. Food Chemistry, 2010, 118(1): 128-132.
- [21] TSUKAKOSHI Y, NAITO S, ISHIDA N, et al. Variation in moisture, total sugar, and carotene content of Japanese carrots: Use in sample size determination[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2009, 22(5): 373-3807.
- [22] HOU F, HU K, GONG Y, et al. Effects of *in vitro* simulated digestion on the flavonoid content and antioxidant activity of aged and fresh dried tangerine peel[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(3): e13532.
- [23] 赵建, 刘璇, 文镜. 荧光分光光度计测定保健食品总抗氧化能力[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 301-305.
- ZHAO J, LIU X, WEN J. Determination of total antioxidant capacity of health food by fluorescence spectrophotometer, 2010, 31(22): 301-305.
- [24] 王静, 刘丁丽, 罗丹, 等. 体外模拟消化对藜麦抗氧化活性、 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性影响研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 51-58.
- WANG J, LIU D L, LUO D, et al. Effects of simulated digestion *in vitro* on antioxidant activity and antioxidant activity of α -glucosidase and α -amylase on the effect of quinoa on its inhibitory activity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(4): 51-58.
- [25] SHARMA P, GUJRAL H S. Antioxidant potential of wheat flour chapattis as affected by incorporating barley flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(1): 118-123.

Effects of Processing Methods on the Effective Components, Antioxidant Activity and α -Glucosidase Inhibition Activity of *Apios americana* Medik

Deng Ke, Yang Liangyuan, Hu Yu, Xu Guangzhi, Wang Yan, Zhang Youzuo, Ni Qinxue*
(School of Food and Health, Zhejiang Agriculture & Forest University, Hangzhou 311300)

Abstract The effects of different processing methods (peeling, with skin, extrusion, fermentation and frying) on the contents of total phenols, total sugars, total flavonoids, isoflavones, alkaloids and antioxidant activities (DPPH, ABTS⁺ scavenging and FRAP system), α -glucosidase inhibition of *Apios americana* Medik were evaluated by simulated digestion *in vitro*. Compared with the processing control group, the contents of total phenols, isoflavones and alkaloids increased by 73.46%, 42.02% and 56.61% respectively in the fermentation treatment, 19.68% in the extrusion treatment and

31.19% in the frying treatment. The antioxidant capacity of DPPH, ABTS⁺ and FRAP increased by 6.81%–19.77%, 21.02%–41.96% and 3.24%–35.99%, respectively; At the same time, the effect of simultaneous fermentation on α -glucosidase inhibition rate increased by 33.6%. Among the five processing methods, fermentation is the best method to retain the total phenols, isoflavones and alkaloids, extrusion is the best method to retain the total flavonoids, and frying is the best method to retain the total sugar.

Keywords *Apios americana* Medik; processing methods; *in vitro* digestion; active component content; antioxidant activity; α -glucosidase inhibition