

## 体外模拟大豆种皮多糖胃肠道消化特性研究

杨立娜<sup>1,2</sup>, 王子义<sup>1,2</sup>, 蔡文琪<sup>1,2</sup>, 吴星会<sup>1,2</sup>, 王胜男<sup>1,2</sup>, 蔚彦平<sup>3</sup>, 周大字<sup>1,2</sup>, 刘贺<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>渤海大学食品科学与工程学院 辽宁锦州 121013

<sup>2</sup>辽宁省粮谷类食品生物高效转化工程研究中心 辽宁锦州 121013

<sup>3</sup>阜新和润生物技术有限公司 辽宁阜新 123000

**摘要** 为探究大豆种皮多糖在胃肠道的消化特征,采用体外模拟的方式进行分析,结果表明:大豆种皮多糖在模拟消化过程中,总糖和糖醛酸含量从口腔到小肠阶段无明显变化,其含量分别在 126 mg 和 29 mg 波动,而总糖含量在大肠阶段酵解 12 h 时开始下降,在酵解 48 h 后显著下降为(71.02±0.45) mg,还原糖含量由初始的(18.04±0.15) mg 经历消化阶段后增加到(81.13±0.36) mg,在随后的酵解阶段最终降低为(51.55±1.31) mg;电位绝对值在消化阶段由 3.46 mV 增加到 20.10 mV,在大肠阶段显著下降,酵解 48 h 后,电位绝对值变为 15.26 mV;粒径在整个消化阶段呈明显的下降趋势,pH 值在口腔到小肠阶段未发生显著变化,在大肠阶段由 7.92 下降到 5.93;消化液黏度呈逐渐下降趋势。

**关键词** 大豆种皮多糖; 体外消化; 总糖; 粒径

文章编号 1009-7848(2022)09-0055-08 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.09.006

大豆是我国重要的经济作物,在大豆深加工的过程中产生了大量的副产物,如大豆种皮、豆渣和黄浆水等。大豆种皮经济价值较低,一般用于牲畜的饲料<sup>[1]</sup>。然而,大豆种皮含有丰富的膳食纤维和多糖等营养物质<sup>[2]</sup>,具有较高的利用价值。大豆种皮多糖是以大豆种皮为原料制备的水溶性多糖,是一种新型的天然大分子物质。前期研究发现在微波辅助草酸铵和草酸提取条件下,以以上两种提取剂提取的多糖呈蠕虫状,且以草酸为提取剂的多糖明显促进了粪便中益生菌的增殖。此外,还发现大豆种皮多糖通过调节肠道菌群和抑制 TLR-4/NF- $\kappa$ B 信号通路减轻了小鼠的肠道炎症<sup>[3]</sup>。除此之外,大豆种皮多糖还具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、降血糖以及调节肠道微生态等功能<sup>[4-8]</sup>,具有广阔的应用前景。

消化作为机体代谢和营养物质吸收的关键步骤,实现了将食物大分子物质转化为机体可吸收的小分子物质,并通过特定的代谢部位发挥功能。大部分多糖作为大分子物质难以在胃肠道被人体消化吸收,主要是在大肠处被微生物酵解,产生大

量的短链脂肪酸,如乙酸、丙酸、丁酸等<sup>[9]</sup>。目前,还没有关于大豆种皮多糖在人体消化道(即口腔、胃、小肠、大肠)消化情况的报道。本试验以人体胃肠道模拟系统为基础,探究大豆种皮多糖在体内的消化情况。

### 1 材料和方法

#### 1.1 材料与试剂

大豆种皮,购于山东禹王实业有限公司;胰蛋白酶、胰蛋白胨、猪胃黏蛋白、L-半胱氨酸、牛磺胆酸钠,购于上海源叶生物有限公司;草酸铵、硫酸、氯化钾、磷酸二氢钾、氯化钠、磷酸氢二钠、乙醇、苯酚、咪唑等试剂,均为国产分析纯试剂。

#### 1.2 仪器

UV-2550 紫外-可见分光光度计,日本 Shimadzu 公司;PHS-3C pH 计,上海雷磁仪器厂;NanoBrook 90Plus 粒度分析仪,美国 Brookhaven 仪器公司;T & J-MiniPod-II 肠道体外模拟系统,上海迪必尔生物工程有限公司;NANO-ZS90 电位分析仪,英国 Malvern 仪器有限公司。

#### 1.3 试验方法

**1.3.1 多糖的制备** 将大豆种皮粉碎,过 60 目筛,按 1:10(料液比)加入乙醇溶液(1%),室温下搅拌 30 min,经过滤后,将滤渣置于 65 °C 鼓风干燥箱中烘干。称取烘干后的滤渣,按料液比 1:20

收稿日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901680)

作者简介: 杨立娜(1987—),女,博士,副教授

通信作者: 刘贺 E-mail: liuhe2069@163.com

加入去离子水,并加入0.6%的草酸钠,在480 W微波条件下作用30 min,过滤后,将滤液以4 000 r/min离心10 min,并将离心后得到的上清液旋转蒸发浓缩至原体积的1/3,调节pH值至4.0,加入双倍浓缩液体积的无水乙醇并不断搅拌,过夜放置后过滤,将滤渣置于65℃恒温干燥箱中烘干,得到大豆种皮多糖(Soy hull polysaccharide, SHP)。

### 1.3.2 体外消化液的配制

1) 模拟口腔液 用去离子水配制酶活力达到100 IU/mL的 $\alpha$ -淀粉酶溶液。模拟胃液,取浓盐酸23.4 mL,加去离子水100 mL,配制成稀盐酸,取上述盐酸1.64 mL,加水约80 mL与胃蛋白酶1 g混匀,加去离子水稀释成100 mL,备用。

2) 模拟小肠液 取0.68 g磷酸二氢钾,加500 mL去离子水溶解,用浓度为0.1 mol/L的氢氧化钠溶液调成pH值为6.8的溶液,另外取1 g胰蛋白酶,加适量去离子水溶解,将两种溶液混匀,加水稀释成100 mL<sup>[10]</sup>,备用。

3) 模拟大肠液 配制含有3.0 g/L黏蛋白,0.37 g/L L-半胱氨酸,12.5 g/L NaCl和0.9 g/L胰酶的基本培养基<sup>[11]</sup>,收集在过去的半年中没有胃肠道疾病和抗生素治疗的一个健康志愿者的新鲜粪便并按等比例混合,以1:10(g/L)与0.01 mol/L磷酸盐缓冲溶液(pH 7.4)混合制备粪便浆液,将其以比例为1:10添加到无菌培养基中,备用。

1.3.3 体外模拟消化 2 mg/mL灭菌的SHP溶液与20 mL过0.22  $\mu$ m滤膜的模拟唾液充分混合,在37℃恒温下反应2 min,取10 mL消化液灭酶终止反应,保存到-80℃冰箱待测。继续加入过0.22  $\mu$ m滤膜的模拟胃液150 mL,消化6 h,用1 mol/L HCl控制pH值为1.5,在2,4,6 h时取样10 mL灭酶保存。继续加入过0.22  $\mu$ m滤膜的模拟小肠液200 mL,消化6 h,用1 mol/L NaHCO<sub>3</sub>控制pH值为6.8,在2,4,6 h时取样10 mL灭酶保存。最后加入灭菌后的大肠液,模拟消化48 h,在12,24,36,48 h时取样10 mL灭酶保存。将多糖溶液换成去离子水作为空白组,重复上述操作。

1.3.4 模拟消化产物中的总糖、还原糖、糖醛酸含量的测定 采用苯酚-硫酸法<sup>[12]</sup>测定总糖含量,标准曲线方程 $y=0.0098x-0.0779$ , $R^2=0.9994$ , $x$ 为葡

萄糖的质量浓度( $\mu$ g/mL)。采用DNS法<sup>[13]</sup>测定还原糖含量,标准曲线方程 $y=1.577x-0.1305$ , $R^2=0.9984$ , $x$ 为葡萄糖的质量浓度(mg/mL)。糖醛酸含量测定采用吡唑-硫酸比色法<sup>[14]</sup>,标准曲线方程 $y=1.9243x+0.0272$ , $R^2=0.9907$ , $x$ 为半乳糖醛酸的质量浓度(mg/mL)。

1.3.5 粒径的测定 根据动态光散射的原理<sup>[15]</sup>,采用NanoBrook 90Plus粒度分析仪来测定不同时间样液等效直径以及粒度分布情况。参数设置:散射角90°,激光波长640 nm,气温37℃,粒子折射率1.59,水溶剂,溶剂的折射率1.33。

1.3.6 Zeta-电位的测定 参考Liang等<sup>[16]</sup>的方法,略改。利用NANO-ZS90电位分析仪进行测定,测试温度为25℃,取1 mL样品于样品皿中,在仪器内平衡2 min,每组试验测定3次。

1.3.7 pH值的测定 重复1.3.2节的操作,不加酸碱控制pH值。采用肠道模拟器消化并监测pH值的变化情况。

1.3.8 流变特性的检测 采用Discovery HR-1流变仪对消化液进行流变学分析。将样品滴加到流变仪平板(直径40 mm,间隙50  $\mu$ m)上,剪切速率为0.01~1 000 s<sup>-1</sup>,37℃下线性剪切300 s,检测多糖消化液的表观黏度随剪切速率的变化情况。

## 1.4 数据分析

采用Origin 8.0软件作图。采用SSPS软件对多组均数进行方差齐性检验(方差不齐时经变量转换达到方差齐性)和单因素方差分析。采用Duncan法比较各组间差异, $P<0.05$ 时差异显著。

## 2 结果

### 2.1 总糖、还原糖、糖醛酸含量变化

多糖在水体系内容易形成聚集体,因此很难判断出聚集体分子质量的改变是由于聚集体的破坏造成的还是聚集体链上的共价键断裂造成的<sup>[17]</sup>。DNS法显色只与糖类游离出还原基团有关,因此通过DNS法检测还原糖含量可以判断聚集体的共价键断裂情况<sup>[18]</sup>。如表1所示,总糖含量在口腔、胃和小肠内变化不大( $P>0.05$ ),在大肠酵解阶段,随着时间的延长,总糖含量呈现下降趋势,糖醛酸也表现出相同的变化趋势。而还原糖的含量在口腔、胃和小肠阶段是逐渐增加的,在大肠酵

解阶段急剧降低,这说明在口腔、胃和小肠内,多糖部分糖苷键发生了断裂导致还原糖增加,因此产生了带有还原性末端的多糖链<sup>[17]</sup>,但是总糖的含量没有因为多糖片段化而改变。而且有报道表明,胃肠道消化可能导致多糖中还原糖的产生<sup>[19]</sup>,

具体的原因可能是酸性环境对多糖链有一定的破坏作用<sup>[20]</sup>。在大肠酵解阶段,肠道菌群酵解 SHP<sup>[19]</sup>,还原糖和糖醛酸含量最终表现出随着发酵时间延长而下降的趋势。

表 1 SHP 体外消化的总糖、还原糖、糖醛酸的变化

Table 1 Changes of total sugar, reducing sugar and uronic acid digested by SHP *in vitro*

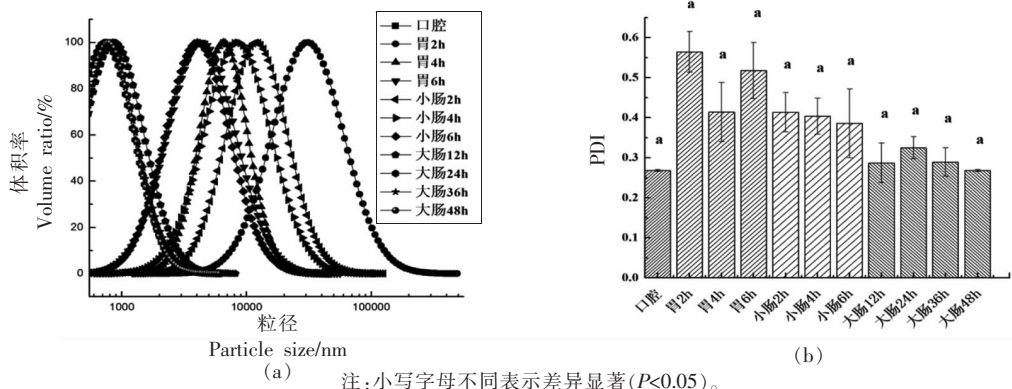
样品名称	时间	总糖含量/mg	还原糖含量/mg	糖醛酸含量/mg
口腔	2 min	126.44 ± 5.62 <sup>a</sup>	18.04 ± 0.15 <sup>a</sup>	28.67 ± 0.34 <sup>a</sup>
胃	2 h	126.23 ± 1.29 <sup>a</sup>	71.19 ± 0.08 <sup>f</sup>	28.68 ± 0.77 <sup>a</sup>
	4 h	125.88 ± 0.66 <sup>a</sup>	73.84 ± 0.47 <sup>e</sup>	28.41 ± 0.68 <sup>a</sup>
	6 h	126.58 ± 0.90 <sup>a</sup>	75.54 ± 0.96 <sup>e</sup>	28.85 ± 0.44 <sup>a</sup>
小肠	2 h	127.89 ± 1.17 <sup>a</sup>	77.64 ± 1.79 <sup>b</sup>	27.78 ± 0.445 <sup>a</sup>
	4 h	127.59 ± 2.77 <sup>a</sup>	80.17 ± 0.49 <sup>b</sup>	27.63 ± 0.78 <sup>a</sup>
	6 h	129.14 ± 2.34 <sup>a</sup>	81.13 ± 0.36 <sup>i</sup>	28.11 ± 0.39 <sup>a</sup>
大肠	12 h	94.61 ± 0.98 <sup>b</sup>	61.61 ± 0.76 <sup>c</sup>	24.71 ± 1.20 <sup>b</sup>
	24 h	88.11 ± 0.49 <sup>c</sup>	57.83 ± 0.44 <sup>d</sup>	18.12 ± 1.92 <sup>c</sup>
	36 h	79.18 ± 0.39 <sup>d</sup>	56.05 ± 1.02 <sup>c</sup>	14.43 ± 1.71 <sup>d</sup>
	48 h	71.02 ± 0.45 <sup>c</sup>	51.55 ± 1.31 <sup>b</sup>	9.64 ± 1.99 <sup>c</sup>

注:同列小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

## 2.2 SHP 消化过程中的粒径变化

黏液粒径是消化产物的重要指标,它直接影响流变特性和消化性能<sup>[21]</sup>。多分散指数(Polydispersity Index, PDI)在 0.07~0.8 之间,表明测量系统的颗粒分布均匀。由图 1 可以看出,在胃和小肠的消化阶段内,等效粒径是随着时间逐渐变小的。尤其是胃 2 h 到胃 6 h,明显下降。在胃到小肠的过渡阶段,加入了模拟肠液,因此在小肠初期(2 h),出现了粒径的小幅度增加,这是由于酶刚加入的模拟液中酶颗粒尚未完全与多糖发生反应,存

在的酶颗粒导致粒径突然增大,同样的,胃初期的粒径增加也是此原因。而在大肠阶段,随着酵解的进行,粒径也是不断减小。在胃和小肠的消化阶段内,粒径减小的原因是多糖糖苷键遭到破坏<sup>[17]</sup>,产生了较小的多糖片段,并且随着消化的进行,多糖链逐步变为含还原性末端的片段多糖,这与还原糖的含量增加的现象相符。大肠阶段是微生物的分解导致粒径变小,随着酵解的进行,消化液中的物质被继续消耗和分解成小分子物质,随后被微生物利用,这与总糖含量在大肠酵解阶段的变化



注:小写字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 模拟消化过程中 SHP 的粒径与 PDI 值

Fig.1 Particle size and PDI value of SHP in simulated digestion

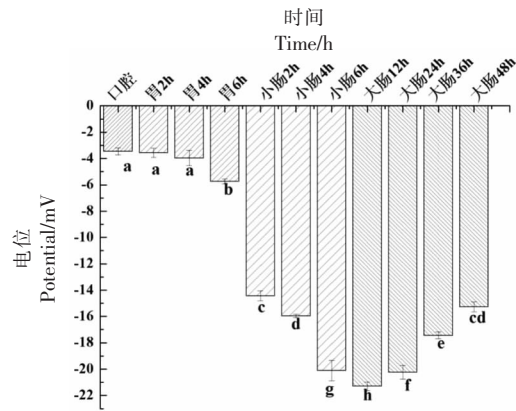
相符<sup>[22]</sup>。

### 2.3 SHP 消化过程中的 Zeta 电位变化

Zeta 电位是对颗粒之间相互排斥或吸引力的强度的度量,分散粒子越小,Zeta 电位的绝对值(正或负)越高。电位值变化如图 2 所示,所有样品表面均带负电,这与钟碧疆<sup>[23]</sup>研究的可溶性大豆多糖不带正电结论相似。在胃和小肠的消化阶段,电位绝对值是上升的趋势,从最初的(3.57±0.35) mV 上升到(20.10±0.78) mV,电位绝对值的变化很明显( $P<0.05$ )。结合粒径和电位我们发现,胃和小肠阶段可能只是单纯的糖苷键断裂,并没有单糖或者寡糖的产生,只是产生了带有还原糖的多糖片段,因此溶液中的粒子逐步变小,液滴之间的静电斥力越强,从而导致电位绝对值的上升<sup>[24]</sup>。大肠阶段在菌群降解作用下,糖分子改变表面电荷分布,其静电屏蔽效应使表面电荷量减少,因此电位绝对值下降,随后被微生物利用,消化液中的物质被利用减少,因此随后的酵解过程中,电位绝对值逐渐下降<sup>[25]</sup>。

### 2.4 SHP 消化过程中的 pH 值变化

pH 值是多糖酵解过程中的主要考察指标之一,一些容易产生致癌物质的腐生菌在较高 pH 值环境下生长活跃,pH 值的降低能有效抑制肠道中腐生菌的生长,同时较低的 pH 值可以防止对 pH 值敏感的病原菌过度生长,如肠杆菌科(Enterobacteriaceae)和梭状芽孢杆菌(Clostridia),从而达到预防和治疗肠道疾病的作用<sup>[26]</sup>。多糖消化过程的 pH 值变化如表 2 所示,胃液 pH 值没有明显变化,维持正常胃液 pH 值 1.5 左右。而正常小肠液(pH 6.8),在加入小肠液后,pH 值仅约为 4。在这两个阶段,多糖没有发生降解,可能只有一些还原性的多糖片段产生,因此没有明显的变化( $P>0.05$ )。碱性的大肠液加入使得初期发酵液的 pH 值呈弱碱性,然后随着大肠发酵的进行,pH 值从(7.91±0.00)下降到(5.93±0.00),下降得很明显, ( $P<0.05$ ),且 pH 值的下降速度在发酵 12~24 h 内较快,在随后的 24 h 内趋于平稳,这是发酵液内的 SHP 被充分消耗了。pH 值的下降表明多糖酵解产物中可能产生了短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFA)<sup>[26]</sup>。Hu 等<sup>[27]</sup>发现在车前子多糖酵解过程中,粪便培养物的 pH 值从 6.10 降低至 5.



注:小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 2 体外模拟消化液的电位

Fig.2 Potential of simulated digestive juice *in vitro*

表 2 体外模拟 SHP 消化的 pH 值

Table 2 pH of simulated SHP digestion *in vitro*

消化器官	时间	pH 值
口腔	2 min	4.00
胃	2 h	1.24 ± 0.01 <sup>a</sup>
	4 h	1.14 ± 0.01 <sup>a</sup>
	6 h	1.26 ± 0.01 <sup>a</sup>
小肠	2 h	4.31 ± 0.01 <sup>b</sup>
	4 h	4.35 ± 0.01 <sup>b</sup>
	6 h	4.37 ± 0.01 <sup>b</sup>
大肠	12 h	7.92 ± 0.01 <sup>c</sup>
	24 h	6.43 ± 0.01 <sup>d</sup>
	36 h	6.04 ± 0.02 <sup>e</sup>
	48 h	5.93 ± 0.02 <sup>f</sup>

注:同列小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

10。山茶花多糖的酵解产物酵解 0 h 的 pH 值为 6.48,酵解 6 h 时的 pH 值为 5.00,pH 值随着酵解时间的延长降低<sup>[28]</sup>。

### 2.5 SHP 消化过程中的流变特性

高分子聚合物的链长直接影响消化液的流变性,而消化液的流变性通常会影响到肠道菌群的定植、分布与生长,进而影响营养物质的吸收效果<sup>[29]</sup>。K 值为稠度系数,是黏度的度量。n 值为流动指数,当  $n<1$  时,液体为假塑性流体。如图 3 和表 1 所示,所有样品均为假塑性流体,消化液的黏度随剪切速率的增加而迅速降低,因为在静电斥力的作用下,外力剪切驱使多糖链成平行流动并且多糖链断裂,导致阻力减小,表观黏度下降<sup>[31]</sup>。从口腔、胃、小肠到大肠阶段,多糖链不断被破坏,粒

径不断减小,多糖含量不断下降,从而导致消化液黏度下降。Xu 等<sup>[30]</sup>研究了覆盆子多糖表观黏度随

剪切速率的变化特性,与本研究结果相近。

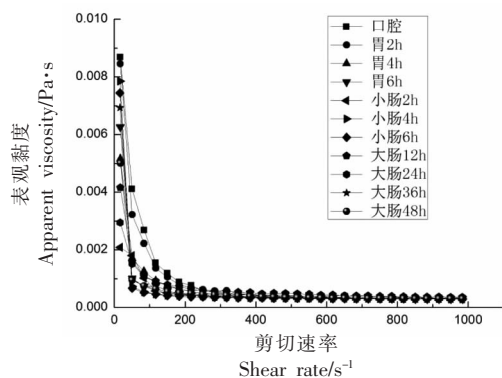


图 3 剪切速率对发酵液表观黏度的影响

Fig.3 Effects of shear rate on the apparent viscosities of fermentation fluid

表 3 幂律模型拟合参数

Table 3 Power law model fitting parameters

样品名称	时间	$K/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$n$	$R^2$
口腔	2 min	$0.063 \pm 0.0040^b$	$0.56 \pm 0.080$	0.88
胃	2 h	$0.042 \pm 0.008^b$	$0.23 \pm 0.084$	0.91
	4 h	$0.020 \pm 0.0015^b$	$0.45 \pm 0.13$	0.91
	6 h	$0.018 \pm 0.0011^b$	$0.74 \pm 0.045$	0.93
小肠	2 h	$0.0018 \pm 0.00038^a$	$0.75 \pm 0.051$	0.96
	4 h	$0.0017 \pm 0.00042^a$	$0.70 \pm 0.042$	0.92
	6 h	$0.0012 \pm 0.00033^a$	$0.76 \pm 0.036$	0.93
大肠	12 h	$0.0061 \pm 0.00057^a$	$0.52 \pm 0.059$	0.98
	24 h	$0.0053 \pm 0.000047^a$	$0.70 \pm 0.15$	0.97
	36 h	$0.0037 \pm 0.00085^a$	$0.68 \pm 0.053$	0.93
	48 h	$0.0029 \pm 0.00089^a$	$0.66 \pm 0.038$	0.98

注:同列小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 3 结论

本试验通过体外模拟人体消化系统,分别模拟了唾液、胃液、小肠和大肠液对多糖的消化作用,研究表明:在口腔、胃、小肠消化过程中,SHP不会被消化,只是发生糖苷键的断裂,生成含有还原性末端的片段,而在大肠酵解阶段,SHP会被微生物利用,最终被微生物降解生成酸性物质。SHP具有膳食纤维的特性,在人体胃肠道内不会被消化分解,而是通过在大肠的酵解产生一些物质来改善肠道环境。

### 参 考 文 献

- [1] IPHARRAGUERRE I R, CLARK J H. Soyhulls as an alternative feed for lactating dairy cows: A review[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86 (4): 1052-1073.
- [2] YANG L N, ZHANG H Y, ZHAO Y F, et al. Chemical compositions and prebiotic activity of soy hull polysaccharides *in vitro*[J]. Food Science and Technology Research, 2019, 25(6): 843-851.
- [3] WANG S N, ZHAO L L, LI Q H, et al. Impact of  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ , and  $\text{Na}^{+}$  on rheological properties and chain conformation of soy hull soluble polysaccharide [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 218-227.
- [4] KOZARSKI M, KLAUS A, NIKŠIĆ M, et al. Antioxidative activities and chemical characterization of polysaccharide extracts from the widely used mushrooms *Ganoderma applanatum*, *Ganoderma lucidum*,

[1] IPHARRAGUERRE I R, CLARK J H. Soyhulls as

- Lentinus edodes and Trametes versicolor[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2012, 26(1/2): 144-153.
- [5] KANG M C, KIM S Y, KIM Y T, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activities of polysaccharide purified from aloe vera (Aloe barbadensis) gel[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 99(99): 361-371.
- [6] MAJA K, ANITA K, MIOMIR N, et al. Antioxidative and immunomodulating activities of polysaccharide extracts of the medicinal mushrooms Agaricus bisporus, Agaricus brasiliensis, Ganoderma lucidum and Phellinus linteus[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1667-1675.
- [7] LEE Y T, KIM Y S. Water - solubility of  $\beta$  - Glucans in Various Edible Mushrooms[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2005, 10(3): 294-297.
- [8] LIU X, CAO S, ZHANG X. Modulation of gut microbiota-brain axis by probiotics, prebiotics, and diet [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(36): 7885-7895.
- [9] XU X F, XU P P, MA C, et al. Gut microbiota, host health, and polysaccharides [J]. Biotechnology Advances, 2013, 31(2): 318-337.
- [10] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.  
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's Republic of China[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015.
- [11] PILAR T, EMMA H, BOUKE N. et al. Long chain arabinoxylans shift the mucosa-associated microbiota in the proximal colon of the simulator of the human intestinal microbial ecosystem (M-SHIME)[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 226-237.
- [12] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356.
- [13] MILLER G L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar [J]. Analytical Biochemistry, 1959, 31(3): 426-428.
- [14] BLUMENKRANTZ N, ASBOE-HANSEN G. New method for quantitative determination of uronic acids [J]. Analytical Biochemistry, 1973, 54(2): 484-489.
- [15] 邢瀚文. 肠膜明串珠菌 DRP105 胞外多糖发酵条件优化及其性质研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- XING H W. Fermentation optimization and characterization of exopolysaccharide isolated from Leuconostoc mesenteroides[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [16] LIANG Y C, GILLIES G, PATEL H. Physical stability, microstructure and rheology of sodium-caseinate-stabilized emulsions as influenced by protein concentration and non-adsorbing polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36(2): 245-255.
- [17] HU J L, NIE S P, MIN F F, et al. Artificial simulated saliva, gastric and intestinal digestion of polysaccharide from the seeds of Plantago asiatica L [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1143-1150.
- [18] CHEN J, LIANG R H, LIU W, et al. Degradation of high-methoxyl pectin by dynamic high pressure microfluidization and its mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28(1): 121-129.
- [19] LI J J, PANG B, YAN X M, et al. Prebiotic properties of different polysaccharide fractions from Artemisia sphaerocephala Krasch seeds evaluated by simulated digestion and *in vitro* fermentation by human fecal microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 414-424.
- [20] 袁清霞, 吴凡, 邱丽淳, 等. 鼎湖鳞伞菌胞外多糖在体外3种模拟消化液中的消化作用[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 72-77.  
YUAN Q X, WU F, QIU L C, et al. Effects of three simulated digestive juices on *in vitro* digestion of exopolysaccharide from Pholiota dinghuensis Bi[J]. Food Science, 2016, 37(5): 72-77.
- [21] JASIM A, SARAH A J, LINU T. A comparison in rheological, thermal, and structural properties between Indian Basmati and Egyptian Giza rice flour dispersions as influenced by particle size [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 48: 72-83.
- [22] 黄靖航, 杨立娜, 赵亚凡, 等. 大豆种皮多糖对模拟肠液流变特性和肠道菌群的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 48-55.  
HUANG J H, YANG L N, ZHAO Y F, et al. Effects of soy hull polysaccharide on the rheological properties of simulated intestinal fluid and intestinal flora[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(12): 48-55.
- [23] 钟碧疆. 可溶性大豆多糖絮凝性及机理研究[D]. 广

- 州: 华南理工大学, 2011.
- ZHONG B J. Study on the flocculation and mechanism of soluble soybean polysaccharide[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [24] 李慧娜, 田少君, 章绍兵. 大豆分离蛋白和浓缩蛋白乳液体系稳定性的比较[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 6-13.
- LI H N, TIAN S J, ZHANG S B. Comparative study on stability of soybean protein isolate and soybean protein concentrate emulsion systems [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 6-13.
- [25] 吴娜娜, 杨晓泉, 郑二丽. 等. 大豆油体乳液稳定性和流变性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(S1): 369-374.
- WU N N, YANG X Q, ZHENG E L, et al. Analysis of stability and rheology of soybean oil body emulsions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1): 369-374.
- [26] 姚思雯, 何佳丽, 朱科学, 等. 菠萝蜜多糖体外降解特征研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 87-94.
- YAO S W, HE J L, ZHU K X, et al. Study on *in vitro* fermentation characteristics of jackfruit polysaccharide[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(3): 87-94.
- [27] HU J L, NIE S P, LI C, et al. *In vitro* fermentation of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. by human fecal microbiota[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 384-392.
- [28] CHEN D, CHEN G J, WAN P, et al. Digestion under saliva, simulated gastric and small intestinal conditions and fermentation *in vitro* of polysaccharides from the flowers of *Camellia sinensis* induced by human gut microbiota[J]. Food & Function, 2017, 8(12): 4619-4629.
- [29] MARIE B, BALDURSDOTTIR S G, MULLERTZ A, et al. Property profiling of biosimilar mucus in a novel mucus-containing *in vitro* model for assessment of intestinal drug absorption[J]. European Journal of Pharmaceutics & Biopharmaceutics, 2014, 87(2): 227-235.
- [30] XU Y, LIU N, FU X, et al. Structural characteristics, biological, rheological and thermal properties of the polysaccharide and the degraded polysaccharide from raspberry fruits[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 109-118.
- [31] 王松松, 陈庆森. 3种发酵乳制品流变性质的比较与分析[J]. 食品科学, 2011, 32(19): 7-11.
- WANG S S, CHEN Q S. Comparison and analysis of rheological properties of three kinds of fermented dairy products[J]. Food Science, 2011, 32(19): 7-11.
- [32] 杨贞耐, 张雪. 乳酸菌胞外多糖的流变学特性和分子结构修饰[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 535-538.
- YANG Z N, ZHANG X. Rheological properties and molecular structure modification of extracellular polysaccharide produced by Lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2007, 28(12): 535-538.

### Studies on Gastrointestinal Digestion Characteristics of Soy Hull Polysaccharide by Simulation *in Vitro*

Yang Lina<sup>1,2</sup>, Wang Ziyi<sup>1,2</sup>, Cai Wenqi<sup>1,2</sup>, Wu Xinghui<sup>1,2</sup>, Wang Shengnan<sup>1,2</sup>,  
Wei Yanping<sup>3</sup>, Zhou Dayu<sup>1,2</sup>, Liu He<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning

<sup>2</sup>Grain and Cereal Food Bio-efficient Transformation Engineering Research Center of Liaoning Province, Jinzhou 121013, Liaoning

<sup>3</sup>Fuxin Herun Biotechnology Co., Ltd., Fuxin 123000, Liaoning

**Abstract** In order to explore the digestive characteristics of soy hull polysaccharide in gastrointestinal tract, the results show that: the total sugar and uronic acid content of soy hull polysaccharide did not change significantly from oral to small intestine during simulated digestion, its content fluctuated between 126 mg and 29 mg, however, the total sugar content began to decrease at 12 h of fermentation in the large intestine stage and significantly decreased to (71.02 ± 0.45) mg after 48 h of fermentation, the content of reducing sugar increased from (18.04 ± 0.15) mg to (81.13 ± 0.36) mg after

digestion, and finally decreased to  $(51.55 \pm 1.31)$  mg in the subsequent fermentation stage; the absolute value of the potential increased from 3.46 mV to 20.10 mV in the digestion stage and decreased significantly in the large intestine stage. After 48 h of fermentation, the absolute value of the potential changed to 15.26 mV; the particle size showed an obvious downward trend during the whole digestion stage, and the pH value did not change significantly during the oral to small intestinal stages, and decreased from 7.92 to 5.93 in the large intestine stage; the viscosity of digestive juice showed a decreasing trend.

**Keywords** soy hull polysaccharide; *in vitro* digestion; total sugar; particle size