

# 梅州金柚柚皮膳食纤维的理化性质分析

曾心悦<sup>1</sup>, 黄嘉泳<sup>1</sup>, 袁显和<sup>1</sup>, 王琴<sup>1</sup>, Charles Brennan<sup>2</sup>, 刘祎帆<sup>1</sup>, 刘映君<sup>1</sup>

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510000) (2. 林肯大学酒、食品与分子生物科学学院, 新西兰克赖斯特彻奇 85084)

**摘要:** 本文采用酶法对金柚中总膳食纤维、水溶性膳食纤维、水不溶性膳食纤维分别进行提取, 并对其结构、理化性质以及肠道功能进行评价。结果表明: 金柚柚皮中总膳食纤维含量为 65.72%, 其中可溶性、水不溶性膳食纤维的得率分别为 15.13%和 43.21%; 总膳食纤维结构为多孔珊瑚状, 水溶性膳食纤维表面有多处孔洞, 水不溶性膳食纤维结构较平整; 三者均含有丰富的葡萄糖、阿拉伯糖、木糖; 水不溶性膳食纤维的持水力和膨胀力较好, 分别为 6.68 g/g 和 27.61 g/g; 在 2.5 mg/mL 和 10 mg/mL 的体系中, 水溶性膳食纤维抑制葡萄糖扩散效果更好, 为 0.11 mg/(mL·h); 水不溶性膳食纤维对  $\alpha$ -淀粉酶抑制效果最好, 此时  $\alpha$ -淀粉酶活性为 93.90%; 水溶性纤维破坏胆固醇能力最强, 分别为 7.20%和 9.40%。同时, 水溶性膳食纤维具有更优越的 DPPH·清除能力和铁离子还原能力。通过酶解法制得的柚皮膳食纤维有较好的理化性质, 可以作为优良的食品添加剂在食品中应用。

**关键词:** 金柚柚皮; 酶提法; 膳食纤维, 单糖组成; 肠道功能

文章编号: 1673-9078(2020)04-73-81

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.4.010

## Physical and Chemical Properties of Dietary Fiber of Meizhou Golden Pomelo Peel

ZENG Xin-yue<sup>1</sup>, HUANG Jia-yong<sup>1</sup>, YUAN Xian-he<sup>1</sup>, WANG Qin<sup>1</sup>, Charles Brennan<sup>2</sup>, LIU Hui-fan<sup>1</sup>,  
LIU Ying-jun<sup>1</sup>

(1.College of Light Industry and Food Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510000, China)(2.Lincoln University, Christchurch 85084, New Zealand)

**Abstract:** In this work, the total dietary fiber, water-soluble dietary fiber and water-insoluble dietary fiber in golden pomelo were extracted by enzymatic method. Their structure, physicochemical properties and intestinal function were evaluated. The results showed that the content of total dietary fiber in the peel was 65.72%, and the yield of soluble and water-insoluble dietary fiber were 15.13% and 43.21%, respectively. The structure of the total dietary fiber was porous coral. The water-soluble dietary fiber had many holes on the surface, and the structure of water-insoluble dietary fiber was smooth. All kinds of dietary fiber were rich in glucose, arabinose and xylose. The water holding capacity and swelling capacity of water-insoluble dietary fiber were better, which were 6.68 g/g and 27.61 g/g, respectively. In the 2.5 mg/mL and 10 mg/mL systems, water-soluble dietary fiber had a better inhibitory effect on glucose diffusion 0.11 mg/(mL·h). Water-insoluble dietary fiber had the best inhibitory effect on alpha-amylase, and alpha-amylase activity was 93.90%±0.02%. Water-soluble fiber had the strongest ability to destroy cholesterol, and the destruction rate were 7.20% and 9.40%, respectively. The water-soluble dietary fiber also had better DPPH· scavenging ability and iron reduction ability. The dietary fiber of pomelo peel obtained by enzymatic hydrolysis had better physicochemical properties and could be used as an excellent food additive in food.

**Key words:** pomelo; enzymatic extraction; dietary fiber, monosaccharide composition; intestinal function

引文格式:

曾心悦,黄嘉泳,袁显和,等.梅州金柚柚皮膳食纤维的理化性质研究[J].现代食品科技,2020,36(4):73-81

ZENG Xin-yue, HUANG Jia-yong, YUAN Xian-he, et al. Study on the physical and chemical properties of dietary fiber of Meizhou golden pomelo peel [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(4): 73-81

收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(粤科资字〔2019〕997号); 广东省农业厅对外合作项目(粤财农〔2019〕73号); 广东大学生科技创新培育专项资金(pdjh2019b0245); 仲恺农业工程学院本科生科技创新资金(k1190930106)

作者简介: 曾心悦(1998-), 女, 本科, 研究方向: 天然产物开发

通讯作者: 刘祎帆(1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物开发

金柚是岭南特色水果之一,味美价廉,营养丰富,深受消费者喜爱。柚皮是柚果的一种主要副产物,但利用率极低,柚皮渣常作为饲料原料,经常被丢弃<sup>[1]</sup>,但是它具有一定的可加工性,因此可对其进行深入研究,从而提高金柚的附加值。柚皮中富含黄酮、多糖、膳食纤维等多种活性物质,其中柚皮苷占柚皮总黄酮含量的80%以上,采用超声波辅助浸提法的技术对金柚柚皮中的柚皮苷进行提取,具有较高的得率与良好的清除自由基能力<sup>[2]</sup>。有研究发现,金柚柚皮精油既拥有柚子独特芳香风味(除柚香味还有一定薄荷味)<sup>[3]</sup>,又有祛痰、止咳、平喘、镇痛、消炎等作用,是良好的医药、食品行业的原材料<sup>[4,5]</sup>。同时,柚皮中膳食纤维含量较高,故对其进行提取利用有一定研究价值。

膳食纤维本身不具有营养价值,却被称为“第七类营养素”,因为其具有持水力、膨胀力、乳化能力等理化性质,对肠道菌群具有一定的调节作用,能预防多种疾病<sup>[1]</sup>。膳食纤维主要根据其在水中的溶解性,可分为水溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)与水不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)。目前,在对柑橘属皮渣制备膳食纤维的研究中发现,柑橘膳食纤维水溶性膳食纤维含量高,可应用于各种饮料、果冻制品,改善食品风味和质感,同时也具有一定的抗氧化性,增强食品的保健功能。但是专注于研究柚皮膳食纤维的研究仍然较少。

因此,本研究以柚皮膳食纤维为主要研究对象,分别提取总膳食纤维、水溶性膳食纤维以及水不溶性膳食纤维,并对其结构特征、理化性质以及功能进行评价。同时,考虑到市面上通过添加柚皮膳食纤维制备饼干的研究较少,而柚皮膳食纤维有柚子独特风味<sup>[6]</sup>,因此本研究将制作一款柚皮膳食纤维饼干,为柚皮渣开发与综合利用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

梅州金柚(外皮无明显凹陷):购自梅州海吉星水果市场。

耐高温 $\alpha$ -淀粉酶(4000 U/g)、纤维素酶(400 U/mg)、木瓜蛋白酶(800 U/mg),上海瑞永生物科技有限公司;糖化酶、中性蛋白酶,河南万邦实业有限公司;单糖标准品,美国Sigma公司;其他试剂均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

XL-10B型干样粉碎机,广州市旭朗机械设备有限公司;TGL16型台式高速冷冻离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司;DHG-9140A型鼓风干燥箱,沙鹰科学仪器(上海)有限公司;HYHG-II-72型远红外干燥箱,上海跃进医疗器械有限公司;HH-6型恒温循环水浴锅,常州国华电器有限公司;PHS-3C型雷磁精密酸度计,上海精密科学仪器有限公司;FT-IR分光光度计,美国Bruker公司;Supra55扫描电镜,德国Zeiss公司;QP2010plus型气相质谱联用色谱仪,日本岛津公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 新鲜柚子的预处理

将新鲜柚子剥皮,切成均匀的3 cm小块,经鼓风干燥机完全干燥后,再粉碎样品后过80目筛转移到烧杯中,用封口膜密封烧杯备用。

#### 1.3.2 膳食纤维的提取

##### 1.3.2.1 总膳食纤维(TDF)制备

取10 g柚子粉体置于250 mL锥形瓶中,以1:10的比例加入去离子水进行搅拌并微波振荡15 min,在沸水浴中糊化15 min,再在50 °C下振荡30 min,接着加入耐高温 $\alpha$ -淀粉酶在95 °C下酶解60 min,然后加入糖化酶在60 °C下酶解60 min,再加入中性蛋白酶在55 °C下酶解120 min,最后沸水灭酶15 min,冷却,4倍无水乙醇处理,过夜放置,抽滤,冻干,得总膳食纤维<sup>[7]</sup>。

##### 1.3.2.2 水溶性膳食纤维(SDF)制备

取一定量柚子粉体置于50 mL离心管中,以1:10的比例加入去离子水进行溶解,进行离心分离(4500 r/min 15 min)后取上清液,再加入20 mL醋酸-醋酸钠缓冲液,混匀,在沸水浴中煮沸1 h,冷却,加入纤维素酶液3%(体积分数),酶解1.5 h,加热到85 °C,10 min灭酶,降温至60 °C,再加入木瓜蛋白酶溶液,酶解30 min,迅速冷却,过滤,并用乙醇清洗盛滤液的容器,将漏斗及沉淀物100 °C烘干至恒重,计算产率<sup>[8]</sup>。

##### 1.3.2.3 不水溶性膳食纤维(IDF)制备

取一定量柚子粉体置于50 mL离心管中,以1:10的比例加入去离子水进行溶解,进行离心分离(4500 r/min,15 min)后取沉淀,进行酶法处理( $\alpha$ -淀粉酶,温度70 °C, pH 5.5,加酶量0.6%,时间80 min),继而过滤,取滤渣烘干,得水不溶性膳食纤维<sup>[9]</sup>。

#### 1.3.3 理化性质的测定

##### 1.3.3.1 柚皮膳食纤维化学成分分析

蛋白质含量的测定采用微量凯氏定氮法<sup>[10]</sup>;灰份

含量的测定采用 GB 5009.4-85; 水不溶性膳食纤维含量的测定采用 GB 12394-90<sup>[11,12]</sup>; 水溶性膳食纤维含量的测定采用改良的水溶性膳食纤维含量快速分析法<sup>[12]</sup>。

### 1.3.3.2 扫描电镜分析

在进行扫描电镜分析之前, 1 mg 的 TDF、SDF、IDF 样品放入仪器进行喷金, 喷金完成后, 使用 Zeiss, Supra 55 电镜进行分析。

### 1.3.3.3 红外光谱分析

将 5 mg 的 TDF、SDF、IDF 样品与 KBr 压片, 使用 FT-IR 分光光度计(Bruker, Billerica, MA, USA) 在 4000~500 cm<sup>-1</sup> 波长范围内测定光谱吸收<sup>[13]</sup>。

### 1.3.3.4 单糖组成测定

乙酰化衍生物制备: 取 2 mg TDF、SDF、IDF 样品, 加入 1 ml 的 2M 三氟乙酸水解 90 min, 使用旋转蒸发仪蒸干。残基加入 2 mL 双蒸水、100 mg 硼氢化钠还原, 加入冰醋酸中和, 继续旋蒸, 110 °C 烘箱烘干, 然后加入 1 mL 乙酸酐乙酰化 100 °C 反应 1 h, 冷却。加入 3 mL 甲苯, 减压浓缩蒸干, 重复 4~5 次, 以除去多余的醋酐。将乙酰化后的产物用 3 mL 氯仿溶解后转移至分液漏斗, 加入少量蒸馏水充分震荡后, 除去上层水溶液, 如此重复 5 次。氯仿层以适量的无水硫酸钠干燥, 定容至 10 mL。

GC-MS 分析: RXI-5 SIL MS 色谱柱 (30×0.25×0.25); 程序升温条件为: 起始温度 120 °C, 以 3 °C/min 升温至 250 °C/min; 保持 5 min; 进样口温度为 250 °C, 检测器温度为 250 °C/min, 载气: 氦气, 流速为 1 mL/min。

### 1.3.3.5 持水力

取 0.5 g TDF、SDF、IDF 试样加入到 50 mL 离心管中, 加入蒸馏水后混合均匀, 静置 10 min, 离心弃掉上清液后进行测量<sup>[14]</sup>。

$$\text{持水力 (g/g)} = \frac{\text{样品持水后质量 (g)} - \text{样品质量 (g)}}{\text{样品质量 (g)}}$$

### 1.3.3.6 膨胀力

精确称取 0.1 g 的 TDF、SDF、IDF 试样加入 30 mL 蒸馏水, 混合均匀后, 室温下放置 18 h, 记录试样吸水膨胀后在刻度试管内的读数<sup>[14]</sup>。

$$\text{膨胀力 (mL/g)} = \frac{\text{样品膨胀后体积 (mL)}}{\text{样品质量 (g)}}$$

## 1.3.4 膳食纤维体外功能测定

### 1.3.4.1 葡萄糖转运

分别量取 5 mL 的 SDF、IDF 和 TDF 溶液(DF 溶液均为 2.5 mg/mL 和 10 mg/mL), 使其分别和 5 mL 100 mmol/L 的葡萄糖溶液混合, 每个样品往独立透析袋

(8000~14000 分子量)装入 10 mL, 并置于 200 mL 去离子水中, pH 7.0, 37 °C, 进行透析<sup>[15]</sup>。按时间梯度, 在 1、2、3、4、5、6 h 时取透析液 1 mL, 并用苯酚硫酸法测定葡萄糖含量<sup>[16]</sup>, 每个样品做需 3 次重复实验。按以下公式计算葡萄糖透析延迟指数 (GDRI):

$$y = ax^2 + bx + c$$

式中: y-葡萄糖含量; x-时间 a、b、c-系数; 在任何时间计算扩散速率 (dy/dx) 的等式是 dy=2ax+b。当 x 接近 0 时, dy=V<sub>max</sub>=b。

### 1.3.4.2 对 α-淀粉酶活性的影响<sup>[15]</sup>

将 0.1 mL α-淀粉酶溶液 (1 mg/mL, 150,000 单位/g)、2 mL 1% 的土豆淀粉溶液和 0.4 mL TDF、IDF、SDF 溶液 (DF 溶液均为 2.5 mg/mL 和 10 mg/mL), 在 pH 7.0, 37 °C 条件下搅拌反应 1 h。以 0.4 mL 去离子水作为空白对照组。待反应时间到达后, 在加入 2 mL N NaOH 停止反应后, 进行 10 min 4800×g 的离心, 最后用二硝基水杨酸法测定各样品上清液的终浓度。<sup>[15]</sup>所有分析均进行 3 次。

### 1.3.4.3 对胆固醇的破坏

将 6.6 mol/L 牛磺胆酸盐、2.4 mol/L 卵磷脂 0.5 mol/L 胆固醇和 132 mol/L 氯化钠混合成胆固醇胶团溶液, 使其在 15 mol/L 磷酸盐缓冲溶液(pH 6.3), 37 °C 下搅拌孵育 24 h。之后, 将 1.0 mL DF (2.5 和 10 mg/mL) 加入到 2.5 mL 胆固醇胶团溶液中, 并在 37 °C 下缓慢搅拌 1 h。通过 0.22 μm Millipore 的滤头 (Bedford, MA)<sup>[17]</sup>进行过滤后, 用邻苯二甲醛法测定滤液中胆固醇含量<sup>[18]</sup>。

### 1.3.4.4 DPPH 自由基的清除能力<sup>[19]</sup>

取 1 mL 样液与 4 mL 0.2 mmol/L DPPH·混合均匀, 避光反应 30 min, 然后进行 10 min 的离心操作, 用无水乙醇作紫外调零, 在 517 nm 下测定其吸光度记为 A<sub>1</sub>。使用相同的步骤和方法测定 A<sub>0</sub> 和 A<sub>2</sub>。按以下公式计算清除率:

$$\text{清除率(\%)} = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100\%$$

式中: A<sub>0</sub> 为 4 mL DPPH·乙醇与 1 mL 乙醇均匀混合; A<sub>1</sub> 为 4 mL DPPH·乙醇与 1 mL 样品均匀混合; A<sub>2</sub> 为 4 mL 乙醇与 1 mL 样品均匀混合。

### 1.3.4.5 还原力测定

取 1 mL 样液, 加入 0.2 mol/L 磷酸缓冲液和 1% 铁氰化钾各 2.5 mL, 均匀混合后在 50 °C 水浴加热 20 min, 待冷却后, 再加入 10%三氯乙酸 2.5 mL, 混匀, 10 min 过后取 2.5 mL 试液, 与 2.5 mL 水, 1 mL 0.1% FeCl<sub>3</sub> 混合均匀, 10 min 后在 700 nm 处测吸光度, 以抗坏血酸为对照<sup>[20]</sup>。

### 1.3.5 数据处理

以上所有实验设3个平行, 实验结果用平均值±标准差(mean±SD)的方式表示。采用美国 IBM 公司 SPSS Statistics 25 软件, 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)中的邓肯法(Duncan)分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 柚皮膳食纤维的理化性质分析

本研究采用酶提取法所得到的膳食纤维得率水不溶性膳食纤维、水溶性膳食纤维与总膳食纤维得率分别为 43.21%、15.13%、65.72%, 由于总膳食纤维与其他两种膳食纤维的提取方法稍有不同, 所以水溶性膳食纤维与水不溶性膳食纤维含量相加不满足等式(表1)。其中 SDF 蛋白质含量为 1.05%, 灰分含量为 3.92%, 在三种膳食纤维中纯度最高。与微波提取法提取柑橘膳食纤维<sup>[21]</sup>相比, 本实验中水不溶性膳食纤维的得率更高, 高 25.08%。与纯化学方法从柚子皮中<sup>[22]</sup>提取膳食纤维相比, 低 22.51%。但是本实验使用酶法提取的膳食纤维中, 在使用原材料相同情况下, 蛋白质的含量比纯化学法提取<sup>[22]</sup>低 1.00%, 这说明使用酶法提取的膳食纤维纯度更高, 所含的蛋白质杂质更少。与另一食品加工副产品豆渣相比, 豆渣提取出的水溶性膳食纤维仅为 11.17%, 而柚皮提取出的水溶性膳食纤维为 15.13%, 得率更高。这证明金柚柚皮的开发利用前景较好, 可以作为优质的膳食纤维原材料。

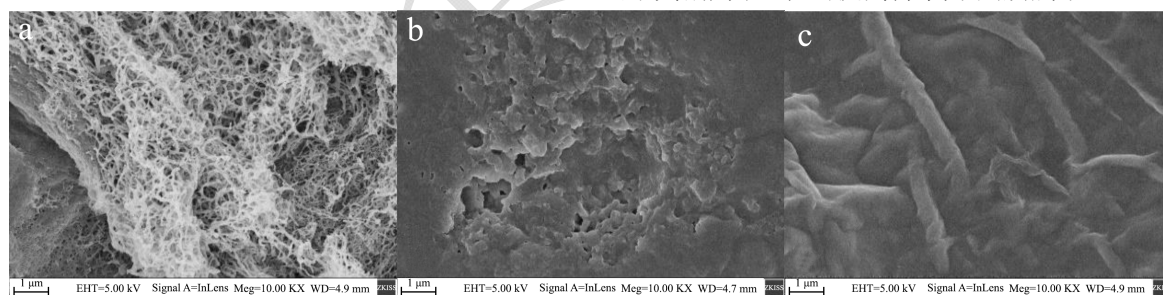


图1 TDF (a)、SDF (b)、IDF (c) 在电镜下放大 10000 倍的表面结构

Fig.1 TDF(a), SDF(b), IDF(c) microstructure under 10000x magnification.

### 2.3 单糖组成分析

表3 TDF、SDF、IDF 的单糖组成 (mol%)

Table 3 The monosaccharide composition of TDF, SDF and IDF (mol%)

样品	鼠李糖	岩藻糖	阿拉伯糖	木糖	甘露糖	葡萄糖	半乳糖
TDF	2.10±0.14 <sup>a</sup>	1.40±0.08 <sup>a</sup>	17.80±3.10 <sup>c</sup>	8.40±1.22 <sup>c</sup>	4.60±0.33 <sup>b</sup>	55.50±1.76 <sup>a</sup>	10.30±2.25 <sup>b</sup>
SDF	1.90±0.20 <sup>b</sup>	0.80±0.14 <sup>c</sup>	26.60±2.15 <sup>b</sup>	3.00±0.27 <sup>b</sup>	5.20±0.28 <sup>a</sup>	41.70±3.60 <sup>c</sup>	23.80±1.02 <sup>a</sup>
IDF	1.60±0.27 <sup>c</sup>	1.30±0.12 <sup>b</sup>	23.00±0.96 <sup>a</sup>	10.60±0.13 <sup>a</sup>	4.20±0.45 <sup>c</sup>	46.50±2.53 <sup>b</sup>	9.80±2.41 <sup>c</sup>

注: 同列不同字母表示显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

表1 柚皮膳食纤维得率(干基, %)

Table 1 The yield of dietary fiber extracted from pomelo peel (dry matter, %)

样品	TDF	SDF	IDF
柚皮	65.72±2.67 <sup>a</sup>	15.13±1.38 <sup>c</sup>	43.21±3.21 <sup>b</sup>

注: 同行不同字母表示显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

表2 TDF、SDF、IDF 理化组成测定结果(干基, %)

Table 2 The chemical composition of TDF, SDF and IDF (dry matter, %)

样品	蛋白质	灰分
TDF	1.11±0.02 <sup>b</sup>	4.08±0.43 <sup>b</sup>
SDF	1.05±0.03 <sup>c</sup>	3.92±0.02 <sup>a</sup>
IDF	1.16±0.01 <sup>a</sup>	4.54±0.34 <sup>b</sup>

注: 同列不同字母表示显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

### 2.2 电镜结果分析

在放大 10000 倍时, 由图 1a 可得, 柚皮总膳食纤维呈多孔珊瑚状结构, 结构疏松, 表面不平整。通过图 1b 可见水溶性膳食纤维表面不光滑, 相对粗糙, 有多处孔状结构, 但是与总膳食纤维(1a)相比之下更为紧密。从图 1c 可以看出, 水不溶性膳食纤维的结构比较平整, 但仍存在一些条状凸起和沟壑, 相比另外两种膳食纤维, 孔状结构较少。综上, 总膳食纤维的结构最为疏松, 更利于其与水分的结合, 使水分滞留在孔隙之中,<sup>[14]</sup>形成氢键或偶极作用, 增加膳食纤维的吸附能力, 从而提高持水力和膨胀力<sup>[23]</sup>。

柚皮中三种膳食纤维所含的单糖种类及含量如表 3 所示。三者葡萄糖含量最高,阿拉伯糖、木糖、甘露糖、半乳糖为主要的单糖,而阿拉伯糖、木糖、半乳糖的含量各在组分之间存在差异。表 3 为几种膳食纤维的单糖组成,可以看出,水溶性膳食纤维中的阿拉伯糖含量为 26.60%、半乳糖含量为 23.80%,含量明显高于水不溶性膳食纤维;水不溶性膳食纤维中的木糖含量为 10.60%,明显高于水溶性膳食纤维的 3.00%。这是由于阿拉伯糖和半乳糖是果胶类物质的主要成分,多存在于水溶性膳食纤维中。而木聚糖彻底降解可以生成木糖,而木聚糖多存在于水不溶性膳食纤维中<sup>[24]</sup>。

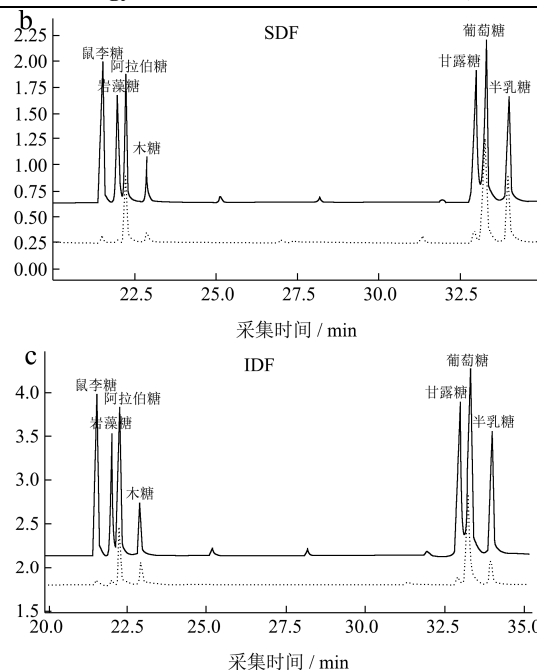
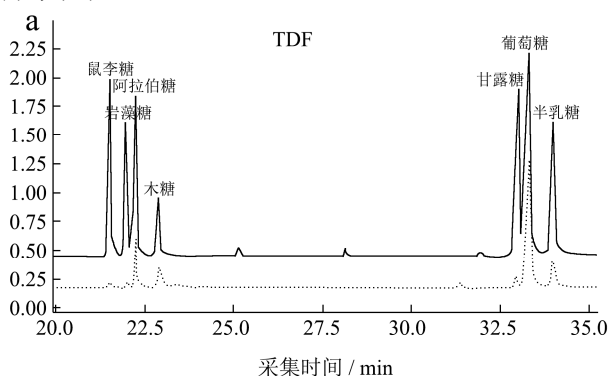


图 2 单糖组成的液相图谱 (TDF、SDF、IDF)

Fig.2 Monosaccharide composition chromatogram of TDF, SDF and IDF

### 2.4 红外光谱分析

表 4 TDF、SDF、IDF 结构对比

Table 4 The structure comparison of TDF, SDF and IDF

样品	扫描电镜	红外光谱/(wavenumbers, cm <sup>-1</sup> )	单糖组成/摩尔比
总膳食纤维 (TDF)	多孔珊瑚状结构, 结构疏松。	O-H 的伸缩振动 (3600~3100 cm <sup>-1</sup> ); C-H 的伸缩振动 (3000 cm <sup>-1</sup> 到 2850 cm <sup>-1</sup> ); 羧基生成的 C=O 的伸缩振动 (1743 cm <sup>-1</sup> ); 游离羧酸或羧酸盐的 C=O 非对称伸缩振动 (1635 cm <sup>-1</sup> ); S=O 伸缩振动 (1238 cm <sup>-1</sup> ); C-O 的伸缩振动 (1150~1000 cm <sup>-1</sup> ); 阿拉伯糖吸收峰 (1062 cm <sup>-1</sup> )。	鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖 (Rha:Fuc:Ara:Xyl:Man:Gal:Glu= 0.11:0.13:0.72:1.40:0.14:0.45:1)
水溶性膳食纤维(SDF)	表面不光滑, 有多处孔状结构。		鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖 (Rha:Fuc:Ara:Xyl:Man:Gal:Glu= 0.17:0.14:1.13:2.05:0.19:1.13:1)
水不溶性膳食纤维(IDF)	结构比较平整, 但仍存在一些条状凸起和沟壑		鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖 (Rha:Fuc:Ara:Xyl:Man:Gal:Glu= 0.39:0.13:1.09:1.94:0.17:0.63:1)

三种膳食纤维的红外光谱结果如图 3 所示。可见, 3600~3100 cm<sup>-1</sup> 处的宽峰为 O-H 的伸缩振动, 从 3000 cm<sup>-1</sup> 到 2850 cm<sup>-1</sup> 的弱吸收峰为 C-H 的伸缩振动, 这两组吸收峰都是糖类的特征吸收峰。1743 cm<sup>-1</sup> 是羧基生成的 C=O 的伸缩振动, 1635 cm<sup>-1</sup> 处为游离羧酸或羧酸盐的 C=O 非对称伸缩振动, 这两组是果胶类多糖的特征峰<sup>[25]</sup>。在 1238 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰为 S=O 伸缩振

动。1150~1000 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰为 C-O 的伸缩振动。而在 1062 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰表明在阿拉伯糖的吸收区域 (1060~1040 cm<sup>-1</sup>)<sup>[26]</sup>。因此, 这三种膳食纤维均含阿拉伯糖, 而总膳食纤维中在红外光谱分析中透过率最低, 所以阿拉伯糖含量最低, 这与单糖组成分析的结果相结果相一致。

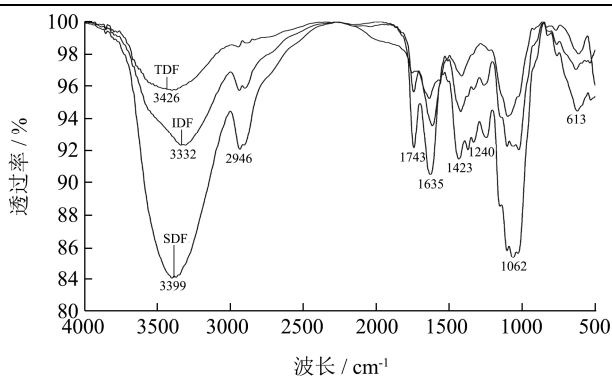


图3 TDF、SDF、IDF的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectroscopic analysis of three kinds of dietary fiber

### 2.5 对柚皮膳食纤维的理化性质分析

膳食纤维降解程度和生理功能与持水力、膨胀力息息相关，所以这两个性质是衡量膳食纤维是否优质的重要指标<sup>[27]</sup>。由表5可以看到：柚皮水不溶性膳食纤维的持水力和膨胀力分别为6.67 g/g和27.61 mL/g，

显著高于总膳食纤维组。柚皮水不溶性膳食纤维与柑橘、小金橘、香橙、金丝柚、丑柑水不溶性膳食纤维相比，膨胀力更高<sup>[21]</sup>。通过电镜分析我们可以看到，总膳食纤维的珊瑚状结构极为疏松，孔洞也明显多于水不溶性膳食纤维。故更有利于水分子的进入和滞留，结合水分子能力与水不溶性膳食纤维相比更强。膳食纤维的高持水性和可以增加人体排便的体积和速度，从而缓解泌尿系统疾病症状<sup>[28]</sup>。

表5 柚皮水不溶性膳食纤维（IDF）和总膳食纤维（TDF）持水力和膨胀力

Table 5 The water holding capacity and swelling capacity of TDF, SDF and IDF

样品	持水力/(g/g)	膨胀力/(mL/g)
IDF	6.67±0.29 <sup>a</sup>	27.61±1.66 <sup>a</sup>
TDF	4.84±0.30 <sup>b</sup>	18.20±4.39 <sup>b</sup>

注：同列不同字母表示显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

### 2.6 柚皮膳食纤维的肠道功能评价

表6 在葡萄糖-多糖体系中葡萄糖扩散的最大速度

Table 6 Maximum velocity of glucose diffusion in glucose-DF system

条件	方程	R <sup>2</sup>	V <sub>max</sub> /(mg/(mL·h))
对照	$y = -1.30 \times 10^{-2}x^2 + 0.17x - 0.09$	0.97	0.17 <sup>d</sup>
TDF-2.5 mg/mL	$y = -1.20 \times 10^{-2}x^2 + 0.13x - 0.13$	0.81	0.13 <sup>c</sup>
SDF-2.5 mg/mL	$y = -1.00 \times 10^{-2}x^2 + 0.11x - 0.06$	0.88	0.11 <sup>a</sup>
IDF-2.5 mg/mL	$y = -1.10 \times 10^{-2}x^2 + 0.12x - 0.10$	0.97	0.12 <sup>b</sup>
对照	$y = -1.30 \times 10^{-2}x^2 + 0.17x - 0.09$	0.97	0.17 <sup>d</sup>
TDF-10 mg/mL	$y = -8.00 \times 10^{-3}x^2 + 0.11x - 0.09$	0.92	0.11 <sup>a</sup>
SDF-10 mg/mL	$y = -1.00 \times 10^{-2}x^2 + 0.13x - 0.13$	0.83	0.13 <sup>c</sup>
IDF-10 mg/mL	$y = -8.00 \times 10^{-3}x^2 + 0.11x - 0.12$	0.86	0.11 <sup>b</sup>

注：同列不同字母表示显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

表7 TDF、SDF、IDF对α-淀粉酶活性的影响

Table 7 Effect of TDF, SDF, IDF on the activity of α-amylase

条件	葡萄糖生产率/10 <sup>-4</sup> mmol/h	α-淀粉酶活性/%
对照	5.33±0.00 <sup>b</sup>	100.00±0.00 <sup>b</sup>
TDF-10 mg/mL	5.15±0.02 <sup>b</sup>	96.53±0.04 <sup>b</sup>
SDF-10 mg/mL	5.13±0.01 <sup>c</sup>	96.12±0.02 <sup>a</sup>
IDF-10 mg/mL	5.08±0.01 <sup>a</sup>	93.91±0.02 <sup>a</sup>

注：同列不同字母表示显著性差异（ $p < 0.05$ ）。

研究表明，多糖的摄入对降血糖有一定的作用<sup>[29]</sup>。膳食纤维影响血糖水平有几种途径，例如增加肠道内容物的粘度，减缓葡萄糖扩散；或抑制α-淀粉酶的活性，延缓淀粉分解成葡萄糖<sup>[30]</sup>。柚皮膳食纤维中含有一定量多糖，有研究表明，多糖能在一定程度上能绑定和吸收葡萄糖，从而影响葡萄糖在体系中的扩散<sup>[15]</sup>。实验结果如表7所示，三种膳食纤维在两种不

同浓度的体系中都能显著地对葡萄糖进行绑定。在浓度为2.5 mg/mL的体系中，水溶性膳食纤维对葡萄糖的绑定和吸收作用最好，为0.113 mg/(mL·h)。由于膳食纤维显微结构中显示出多孔网络结构，葡萄糖可以嵌入其中，所以使其对葡萄糖有一定的绑定作用。在浓度为10 mg/mL的体系中，总膳食纤维的绑定效果更好，为0.105 mg/(mL·h)，与在浓度为2.5 mg/mL的

体系时相比绑定更稳固。总膳食纤维具有明显空隙和大孔洞的多孔结构,毛细管作用更显著,能形成更大的比表面积,拥有更好的吸附性能,更有效阻止体系中葡萄糖的扩散。

$\alpha$ -淀粉酶具有分解多糖形成葡萄糖的作用,与血糖水平有密切联系<sup>[31]</sup>。膳食纤维能够吸附在淀粉表面,影响 $\alpha$ -淀粉酶对淀粉的分解作用<sup>[30]</sup>。本实验利用DNS测定三种膳食纤维经 $\alpha$ -淀粉酶分解后还原糖的浓度,从而验证柚皮膳食纤维对 $\alpha$ -淀粉酶活性的影响。由表7可得,浓度为10 mg/mL的三种膳食纤维溶液均能显著地影响 $\alpha$ -淀粉酶活性,其中水不溶性膳食纤维抑制效果最好,反应后体系中 $\alpha$ -淀粉酶的活性为93.90%,抑制率为6.10%。与南瓜多糖相比,抑制率高出3.58%。总体而言,对 $\alpha$ -淀粉酶活性有一定抑制效果,但不算突出。水不溶性膳食纤维抑制效果好<sup>[32]</sup>,猜测是由于其凹凸不平的沟壑,能使淀粉更好地吸附,降低 $\alpha$ -淀粉酶与底物反应几率。实验还表明,总膳食纤维与水溶性膳食纤维对 $\alpha$ -淀粉酶抑制效果相差不

大,可能是水不溶性膳食纤维中多糖的侧基影响 $\alpha$ -淀粉酶活性。还有研究表明<sup>[15]</sup>, $\alpha$ -淀粉酶与 $\alpha$ -淀粉酶抑制剂作用机理是二者在反应过程中形成特殊复合体,从而使 $\alpha$ -淀粉酶活性丧失<sup>[33]</sup>。

在肠道的代谢过程中,脂肪胶束的形成是胆固醇吸收的关键<sup>[34]</sup>。胆固醇胶束的破坏可以促进胆固醇从消化系统的吸收途径逃逸,使胆固醇可以随粪便排出,从而导致体内胆固醇水平降低<sup>[18]</sup>。本研究测定了未破碎胆固醇胶束的浓度,体现膳食纤维多糖对胆固醇胶束的破坏能力。如表8所示:在2.5 mg/mL和10 mg/mL浓度下,均是水溶性膳食纤维破坏胆固醇的能力最强,分别为7.20%和9.40%。其他研究表明,可溶性多糖能降低胆固醇在混合胶束中的溶解度,导致胆固醇胶束解体,使胆固醇在肠道中的吸收减少<sup>[35]</sup>。这与本实验的结果相符合,说明水溶性膳食纤维中的部分多糖有能影响胆固醇胶束的能力。食用柚皮膳食纤维,可能让人体吸收更少的胆固醇。

表8 TDF、SDF、IDF对胆固醇破坏的影响

Table 8 Effect of TDF, SDF, IDF on the disruption of cholesterol micelle

条件	未破坏的胆固醇/( $\mu$ g/mL)	胆固醇破坏率/%
对照	57.30 $\pm$ 4.50 <sup>a</sup>	-
TDF-2.5 mg/mL	53.30 $\pm$ 2.10 <sup>c</sup>	-4.00 $\pm$ 0.60 <sup>c</sup>
SDF-2.5 mg/mL	50.10 $\pm$ 3.50 <sup>a</sup>	-7.20 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>
IDF-2.5 mg/mL	51.20 $\pm$ 5.70 <sup>b</sup>	-6.10 $\pm$ 0.50 <sup>b</sup>
对照	58.30 $\pm$ 4.50 <sup>a</sup>	-
TDF-10 mg/mL	57.30 $\pm$ 3.90 <sup>c</sup>	-1.00 $\pm$ 0.70 <sup>c</sup>
SDF-10 mg/mL	48.90 $\pm$ 2.30 <sup>a</sup>	-9.40 $\pm$ 0.60 <sup>a</sup>
IDF-10 mg/mL	57.00 $\pm$ 1.40 <sup>b</sup>	-1.30 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>

注:同行不同字母表示显著性差异( $p < 0.05$ )。

## 2.7 抗氧化活性分析

对DPPH·的清除率如表9所示,除抗坏血酸(维生素C)以外,清除能力最强的是水溶性膳食纤维,为50.08%,和麸皮相比<sup>[36]</sup>能力相当;总膳食纤维与水不溶性膳食纤维的对DPPH·清除的能力相当,比水溶性膳食纤维弱。对于铁还原力分析结果表明,水溶性

膳食纤维具有最好的还原能力,与DPPH·清除率表达的结果相吻合。可能是由于水溶性膳食纤维的结构,让部分具有抗氧化能力分子滞留,使其具有一定抗氧化能力。这两个实验结果表明水溶性膳食纤维与另外两种相比,具有更好抗氧化能力,可以作为抗氧化剂添加到食品中,有一定应用前景。

表9 三种膳食纤维抗氧化性质

Table 9 The antioxidant capacity of TDF, SDF and IDF

样品	TDF	SDF	IDF	Vc
清除率/%	37.27 $\pm$ 1.59	50.08 $\pm$ 4.71	33.83 $\pm$ 2.38	92.57 $\pm$ 3.71
还原力/%	0.34 $\pm$ 0.04	0.45 $\pm$ 0.05	0.31 $\pm$ 0.07	0.50 $\pm$ 0.02

## 3 结论

3.1 本实验采用酶法对金柚柚皮中的膳食纤维进行

提取,总膳食纤维含量为65.72%,其中水溶性膳食纤维、水不溶性膳食纤维的得率分别为15.13%和43.21%。在扫描电镜观察下,总膳食纤维结构为多孔

珊瑚状；水溶性膳食纤维表面不光滑、有多处孔洞；水不溶性膳食纤维结构较平整。三种膳食纤维单糖组成为鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖。水不溶性膳食纤维的持水力与膨胀力与总膳食纤维相比较，分别为 6.67 g/g 和 27.61 mL/g。

3.2 体外肠道功能评价分析得出，三种膳食纤维均能与葡萄糖结合，抑制其在体系中的扩散，从而起到降血糖的作用。总膳食纤维对脂肪胶束的破坏有一定的作用，能减少胆固醇的吸收，故可以作为一种新型保健食品的原材料。在抗氧化性质测定中，水溶性膳食纤维的抗氧化性质最佳，有一定的应用前景，可以作为添加剂加入食品中。利用柚皮总膳食纤维制作的酥性饼干有潜在市场，使柚子副产品的高值化利用有了新方向。

### 参考文献

- [1] 何李,李绍振,高彦祥,等.柑橘属果皮渣制备膳食纤维的研究进展[J].食品科学,2012,33(7):310-314  
HE Li, LI Shao-zhen, GAO Yan-xiang, et al. Dietary fiber from citrus pomace: A review [J]. Food Science, 2012, 33(7): 310-314
- [2] 刘伟帆,梁嘉熹,王琴.超声波辅助提取金柚柚皮中柚皮苷的工艺优化及其抗氧化能力研究[J].食品研究与开发,2019,40(13):156-63  
LIU Hui-fan, LIANG Jia-xi, WANG Qin. Study on extraction of naringin from pomelo peel by ultrasonic and its ability to capture free radicals [J]. Food Research and Development, 2019, 40(13): 156-63
- [3] 洪鹏,陈峰,杨远帆,等.三种柚子精油的香味特征及挥发性成分[J].现代食品科技,2014,10:274-281  
HONG Peng, CHEN Feng, YANG Yuan-fan, et al. Sensory characteristics and volatile components of three pummelo (*Citrus maxima*) essential oils [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 10: 274-281
- [4] 张鹰,王满生,曾新安,等.金柚柚皮精油提取条件优化及其抑菌性能研究[J].食品工业,2014,35(5):54-58  
ZHANG Ying, WANG Man-sheng, ZENG Xin-an, et al. Study on extractive condition optimization of essential oil in pomelo peel of golden-pomelo and antibacterial activity [J]. Food Industry, 2014, 35(5): 54-58
- [5] 苏东林,单杨.柑橘果皮中功能性成分的作用概述[J].现代食品科技,2006,2:260-262,256  
SU Dong-lin, SHAN Yang. Review of physiologically-active compounds in citrus peels [J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 2: 260-262, 256.
- [6] 王思远,刘学铭,陈智毅,等.富含膳食纤维的柚皮粉制备及其特性研究[J].现代食品科技,2014,11:177-181  
WANG Si-yuan, LIU Xue-ming, CHEN Zhi-yi, et al. Preparation and characterization of dietary fiber-rich powder from pomelo peel [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 11: 177-181
- [7] 朱玉,郭利娜,楚佳希,等.酶法改性对小米糠膳食纤维体外胆固醇吸附活性的影响[J].食品科学,2015,36(19):211-216  
ZHU Yu, GUO Li-na, CHU Jia-xi, et al. Effect of enzymatic treatment on cholesterol-binding capacity of dietary fiber from millet bran [J]. Food Science, 2015, 36(19): 211-216
- [8] 姜竹茂,陈新美,缪静.从豆渣中制取可溶性膳食纤维的研究[J].中国粮油学报,2001,3:52-55  
JIANG Zhu-mao, CHEN Xin-mei, MIU Jing. Preparation of soluble dietary fiber from soybean dregs [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2001, 3: 52-55
- [9] 邵焕霞.胡萝卜渣中膳食纤维提取工艺研究[J].食品与发酵科技,2009,45(4):55-58  
SHAO Huan-xia. Study on the extraction technology of carrot pomace dietary fiber [J]. Sichuan Food and Fermentation, 2009, 45(4): 55-58
- [10] 黄伟坤.食品检验与分析[M].北京:中国轻工业出版社,1989.  
HUANG Wei-kun. Food Inspection and Analysis [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1989
- [11] GB/T12446-12506, 中国国家标准汇编[S].1994  
GB/T12446-12506, Compilation of Chinese National Standards [S]. 1994
- [12] Manas E, Bravo L, Saura-Calixto F. Sources of error in dietary fibre analysis [J]. Food Chem, 1994, 50(4): 331-342
- [13] Palaniappan Seedeve, Meivelu Moovendhan, Sadhasivam Sudharsan, et al. Structural characterization and bioactivities of sulfated polysaccharide from *Monostroma oxyspermum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72
- [14] 任庆,孙波,于敬鑫,等.白菜渣可溶性膳食纤维酸法提取工艺优化及理化性质测定[J].食品科学,2015,36(10):70-75  
REN Qing, SUN Bo, YU Jing-xin, et al. Optimization of acid extraction and physicochemical properties of soluble dietary fiber from Chinese cabbage residue [J]. Food Science, 2015, 36(10): 70-75
- [15] HU Jie-lun, NIE Shao-ping, LI Chang, et al. *In vitro* effects of a novel polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. on intestinal function [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 54
- [16] Dubois M, Giles K, Rebers P, et al. Colorimetric method for



- determination of sugar and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356
- [17] Kahlon T S, Woodruff C L. *In Vitro* binding of bile acids by rice bran, oat bran, barley and  $\beta$ -glucan enriched barley [J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(3): 260-263
- [18] WANG Qin, LIANG Jia-xi, LIU Hui-fan. *In vitro* effects of four polysaccharides containing  $\beta$ -D-Glu p on intestinal function [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22:1064-1076
- [19] ZI Yu-sha, Zhang Bo, Jiang Biao, et al. Antioxidant action and protective and reparative effects of lentinan on oxidative damage in HaCaT cells [J]. Journal of Cosmetic Dermatology, 2018
- [20] WANG Qin, LUO Jie-ying, LIU Hui-fan. Protective effects of the flavonoid fraction obtained from pomelo fruitlets through ultrasonic-associated microwave extraction against AAPH-induced erythrocyte hemolysis [J]. RSC Advances, 2019, 9(28): 16007-16017
- [21] 孙海燕. 柑橘类膳食纤维的制备及其性能研究[J]. 食品工业科技, 2016:318-321, 329  
SUN Hai-yan. Preparation and performance characterization of citrus dietary fiber [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(4): 318-321, 329
- [22] 梁敏, 潘英明, 唐明明, 等. 从柚子皮中提取膳食纤维的研究 [J]. 化工技术与开发, 2003, 6:20-22  
LIANG Min, PAN Yin-ming, TANG Ming-ming, et al. Study on extraction technology of dietary fiber from shaddock peel [J]. Technology and Development of Chemical Industry, 2003, 6: 20-22
- [23] 王大为, 赵鑫, 董欣, 等. 发芽对绿豆皮膳食纤维结构及性质的影响 [J]. 食品科学, 2016, 37(23):111-117  
WANG Da-wei, ZHAO Xin, DONG Xin, et al. Effect of germination on the structure and properties of dietary fiber in mung bean skin [J]. Food Science, 2016, 37(23): 111-117
- [24] 郑红艳. 小米麸皮膳食纤维的提取及成分和功能性质研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010  
ZHENG Hong-yan. Study on the extraction of millet bran dietary fiber and research on its ingredient functional properties [D]. Chongqing: Southwest University, 2010
- [25] ZHANG Li-fen, YE Xin-qian, DING Tian, et al. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1)
- [26] 支梓鉴, 邹明明, 李珊, 等. 柑橘果肉果胶的流变和结构特性 [J]. 高等学校化学学报, 2016, 37(6):1175-1181  
ZHI Zi-jian, ZOU Ming-ming, LI Shan, et al. Rheological and structural characterization of pectin polysaccharides from citrus pulp [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2016, 37(6): 1175-1181
- [27] 高宇萍, 韩育梅, 李周永, 等. 超声波处理对水不溶性膳食纤维膨胀力及持水力的影响 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(16):299-301  
GAO Yu-ping, HAN Yu-mei, LI Zhou-yong, et al. Effect of ultrasonic treatment on expansive force and water-holding capacity of insoluble dietary fiber [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(16): 299-301
- [28] 钟振声, 王伊沂. 酶解法改善不溶性大豆膳食纤维持水力的研究 [J]. 中国油脂, 2008, 6:57-60  
ZHONG Zhen-sheng, WANG Yi-yi. Improving the water holding capacity of insoluble soybean dietary fiber by enzymatic hydrolysis [J]. China Oils and Fats, 2008, 6: 57-60
- [29] 罗傲霜, 淳泽, 葛绍荣, 等. 迭鞘石斛多糖降血糖作用研究 [J]. 应用与环境生物学报, 2006, 3:334-337  
LUO Ao-shuang, CHUN Ze, GE Shao-rong, et al. Effect of *Dendrobium denneanum* polysaccharide reducing blood glucose *in vivo* [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2006, 3: 334-337
- [30] Ou Shi-yi, Kwok K, Li Yan, et al. *In vitro* study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(2): 1026-1029
- [31] Kobayashi K, Ishihara T, Khono E, et al. Constituents of stem bark of *Callistemon rigidus* showing inhibitory effects on mouse - amylase activity [J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2006, 29(6): 1275-1277
- [32] 黄绍华, 胡晓波, 王震宙. 山药多糖对  $\alpha$ -淀粉酶活力的抑制作用 [J]. 食品工业科技, 2006, 9:94-95  
HUANG Shao-hua, HU Xiao-bo, WANG Zhen-zhou. The inhibition of yam polysaccharide activity on  $\alpha$ -amylase was studied [J]. Science and Technology of Food Industry Semimonthly, 2006, 9: 94-95
- [33] 万艳娟, 刘晓娟, 赵力超, 等. 南瓜多糖抑制  $\alpha$ -淀粉酶及抑菌活性的研究 [J]. 食品科技, 2012, 37(3):44-47  
WAN Yan-juan, LIU Xiao-juan, ZHAO Li-chao, et al. The inhibitory effect on  $\alpha$ -amylase and antibiotic activity from pumpkin polysaccharide [J]. Food Science and Technology, 2012, 37(3): 44-47