

# 不同谷物粉的粉体特性及血糖生成指数体外评价

王宗玄<sup>1,2,3</sup>, 桑若杰<sup>2</sup>, 李旭燕<sup>1,2,3</sup>, 王永霞<sup>1\*</sup>, 李海枝<sup>2,3</sup>, 熊菲菲<sup>4</sup>, 袁媛<sup>4</sup>, 刘磊<sup>5</sup>, 夏凯<sup>2,3\*</sup>

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北邯郸 056038) (2. 中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015) (3. 功能主食创制与慢病营养干预北京市重点实验室, 北京 100015)

(4. 宁波御坊堂生物科技有限公司, 浙江宁波 315012) (5. 神威药业集团有限公司 河北三河 065201)

**摘要:** 对糙米粉、苦荞麦粉、薏米粉、白芸豆粉、燕麦粉 5 种市售谷物粉进行了粉体特性评价和体外模拟消化评价试验, 通过测定各样品的粒径、润湿性、休止角、平板角、松装密度、振实密度等粉体特性指标, 结合流动性指数表进行了评分; 又经过体外模拟消化试验, 测定这些原料的体外模拟血糖生成指数 (Estimated Glycemic Index, eGI)。研究发现糙米粉的粒径分布最均匀, 其次为白芸豆粉和苦荞麦粉; 5 种谷物粉的冲调性存在显著性差异, 其中苦荞麦粉润湿时间最长, 燕麦粉润湿时间最短但冲调易结块; 粉体流动性最好的是糙米粉, 其次为苦荞麦粉和白芸豆粉, 生产传输比较方便; 体外模拟消化试验结果显示: 白芸豆粉的水解率曲线上升趋势最平缓且最终水解率最低, 计算得出白芸豆粉的 eGI=60.62, 对餐后血糖的影响较小。因此白芸豆粉是一种粉体特性较好, 且 eGI 较低的谷物粉, 比较适合糖尿病患者食用, 该结果可为新款代餐粉的研制提供思路。

**关键词:** 谷物粉; 粉体特性; 粒径分布; 体外消化; 血糖生成指数

文章编号: 1673-9078(2023)08-165-170

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.8.0945

## Characteristics of Different Cereal Powders and *in Vitro* Evaluation of Their Glycemic Index

WANG Zongxuan<sup>1,2,3</sup>, SANG Ruojie<sup>2</sup>, LI Xuyan<sup>1,2,3</sup>, WANG Yongxia<sup>1\*</sup>, LI Haizhi<sup>2,3</sup>, XIONG Feifei<sup>4</sup>, YUAN Yuan<sup>4</sup>, LIU Lei<sup>5</sup>, XIA Kai<sup>2,3\*</sup>

(1.College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

(2.China National Research Institute of Food & Fermentation Industries Co. Ltd., Beijing 100015, China)

(3.Beijing Key Laboratory of Functional Staple Food Creation and Chronic Disease Nutrition Intervention, Beijing 100015, China) (4.Ningbo Yufangtang Biotechnology Co. Ltd., Ningbo 315012, China)

(5.Shenwei Pharmaceutical Group Co. Ltd., Sanhe 065201, China)

**Abstract:** The powder characteristics evaluation and *in vitro* simulated digestion of five commercial cereal powders, brown rice powder, bitter buckwheat powder, coix seed powder, white kidney bean powder, and oat powder were performed, through measuring their powder characteristic indices such as particle size, wettability, angle of repose, flat angle, loose bulk density and tap density, along with the flowability index scoring; *In vitro* simulated digestion was conducted to measure their *in vitro* simulated glycemic index (eGI) of these raw materials. The results showed that brown rice powder had the most uniform particle size distribution, followed by the white kidney bean powder and bitter buckwheat powder. There were significant differences in the reconstitutability among the five cereal powders, with the tartary buckwheat

引文格式:

王宗玄,桑若杰,李旭燕,等.不同谷物粉的粉体特性及血糖生成指数体外评价[J].现代食品科技,2023,39(8):165-170

WANG Zongxuan, SANG Ruojie, LI Xuyan, et al. Characteristics of different cereal powders and *in vitro* evaluation of their glycemic index [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 165-170

收稿日期: 2022-07-26

基金项目: 河北省重点研发计划项目 (21327118D); 邯郸市科技研发计划项目 (21422012317); 北京市朝阳区科技计划 (CYSF2216)

作者简介: 王宗玄 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品开发与功效评价, E-mail: 857903417@qq.com; 共同第一作者: 桑若杰 (1990-), 女, 硕士, 研究方向: 功能性食品开发与功效评价, E-mail: srj711@126.com

通讯作者: 王永霞 (1972-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 功能性食品开发与功效评价, E-mail: wyxhd2004@126.com; 共同通讯作者: 夏凯 (1985-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 特医食品与临床营养, E-mail: xiakaiphd@126.com

powder requiring the longest wetting time, and oat powder requiring the shortest wetting time though being easy to form lumps. The brown rice powder had the best flowability, followed by the bitter buckwheat powder and white kidney bean powder, which would make production and transportation more convenient. The results of *in vitro* simulated digestion showed that the hydrolysis rate curve of the white kidney bean powder underwent the slowest increase with the final hydrolysis rate being the lowest. The calculated eGI of the white kidney bean powder was 60.62, indicating the smaller influence on postprandial blood glucose. Therefore, the white kidney bean powder is a kind of cereal powder with good powder characteristics and low eGI, thus is more suitable for diabetes patients, and can provide ideas for the development of new meal replacement powder.

**Key words:** grain powder; powder properties; particle size distribution; *in vitro* digestion; glycemic index

如今糖尿病、肥胖症等慢性病患者数量大幅上升,已成为目前全球性重大的公共卫生问题。这些疾病的发病机理与血糖和胰岛素水平的异常有很大联系<sup>[1,2]</sup>,很多年轻患者因为生活节奏较快,养成了不健康的饮食习惯,导致血糖、胰岛素水平长时间处于异常状态。营养治疗是糖尿病预防和控制过程中不可或缺的一部分<sup>[3]</sup>,其中代餐食品不仅能够快速、便捷地为人体提供各种必要的营养物质,还易使人达到饱腹的效果有助于减轻体重,在年轻人中很受欢迎。

谷物代餐粉,是由谷物、豆类等农产品为主要原料,一种或者多种原料混合制成的粉剂产品,食用便捷且饱腹感强。另外谷物中含有丰富的蛋白质、维生素和膳食纤维等营养素和功能性成分,对降低血糖、调节肠道等有一定的作用<sup>[4]</sup>。比如白芸豆不仅营养丰富,还含有天然的 $\alpha$ -淀粉酶抑制剂,可以阻碍或延缓食物中碳水化合物的水解,极具加工利用价值<sup>[5]</sup>。其他的谷物包括薏米、燕麦等在降低人们餐后血糖浓度方面都有一定的效果<sup>[6-8]</sup>。

代餐粉的品质评价方法多种多样,其中以粉体特性作为评价指标来筛选粉体原料是极其重要的。对于代餐粉的生产、食用来说,物料的流动性、冲调性等粉体学性质直接影响到产品的生产工艺、传输、储存。粉体粒径的变化会导致粉体表面积的改变,影响物料的填充性、流动性、润湿性等粉体特性进而影响产品品质<sup>[9]</sup>。另一方面,食物血糖生成指数(Glycemic Index, GI)是反映食物中碳水化合物餐后血糖应答水平的特征性指数<sup>[10]</sup>,糖尿病、肥胖症等许多慢性疾病的发生、发展都与长期食用高GI食物有一定的关系<sup>[11]</sup>。通过体外模拟消化试验对代餐粉血糖生成指数的研究可以帮助改良代餐粉产品的配方<sup>[12]</sup>。与人体消化试验相比,体外消化具有成本低、实验周期短、可重复性强等优点,在前期原料筛选中具有明显的优势<sup>[13,14]</sup>。综上所述,粉体特性和体外消化特性都会影响代餐粉的品质,但以粉体特性为评价指标结合体外消化评价筛选代餐粉的研究还未见报道。

为筛选出粉体流动性、冲调性较好,且可以降低

餐后血糖应答的代餐粉原料,本文对5种市售谷物粉的粒径分布、流动性和消化特性三个方面,采用激光粒度分析仪和智能粉体物性测试仪进行了粉体特性研究,运用体外模拟消化试验对谷物粉的GI值进行预测,计算为体外模拟血糖生成指数(Estimated Glycemic Index, eGI)值。对产品的粉体特性和eGI进行比较,筛选出粉体流动性、冲调性良好,且eGI较低的谷物粉,可直接冲调食用,也可用于糖尿病的研发。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

糙米粉、苦荞麦粉、薏米粉、白芸豆粉、燕麦粉,山东多麦食品有限公司;NaOH标准溶液、KCl、浓盐酸,北京化工厂有限责任公司;无水CaCl<sub>2</sub>,天津市塘沽邓中化工厂;NaCl、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O,西陇化工股份有限公司;乙酸钠、NaHCO<sub>3</sub>,北京化工厂;无水乙醇,天津市致远化学试剂有限公司;胃蛋白酶、胰酶、3号胆盐、淀粉葡萄糖苷酶,西格玛奥德里齐(上海)贸易有限公司;葡萄糖(Glu)试剂盒,南京建成。

### 1.2 主要仪器设备

SHA-B水浴恒温振荡器,常州金坛精达仪器制造有限公司;HC-3018R高速冷冻离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;Spectra Max i3多功能读板机,美谷分子仪器(上海)有限公司;LDZX-0FB立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;电子天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;S3500激光粒度分析仪,美国Microtrac;BT-1001型智能粉体物性测试仪,丹东百特仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 粒度大小的测定

使用S3500激光粒度分析仪测定各谷物粉的粒径,将样品放到测定样品专用小型钥匙中,选用干法测定。

#### 1.3.2 润湿时间的测定

称取 2 g 的样品均匀平铺到盛有 200 mL 蒸馏水（水温达 40 ℃）的烧杯中，记录从样品加入到完全沉降的时间（s），每个样品 3 个平行。

### 1.3.3 粉体流动性评价

#### 1.3.3.1 压缩度的计算

使用 BT-1001 型智能粉体物性测试仪，按说明组装仪器组件，称量空杯质量及样品松装、振实后的质量，测定各原料的松装密度及振实密度，测定三次。

$$C_p = \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$C_p$ ——压缩度，%；

$\rho_p$ ——振实密度， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；

$\rho_a$ ——松装密度， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

#### 1.3.3.2 凝集度、均齐度的选择

根据松装密度的测定值，按表 1 选择筛网。再在表中所示的筛网上加少量粉体，稍加振动，观察是否全部通过，以此来确定该粉体适用测量凝聚度还是均齐度。

表 1 凝集度、均齐度的适用标准

Table 1 Applicable standards for agglutination degree and homogeneity

| 平均松装密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | <0.4                    | 0.4~0.9                | >0.9                   | 适用  |
|---|-------------------------|------------------------|------------------------|-----|
| 全部通过筛的筛网孔径                              | 150 $\mu\text{m}$ 筛全通过  | 75 $\mu\text{m}$ 筛全通过  | 45 $\mu\text{m}$ 筛全通过  | 凝集度 |
|   | 150 $\mu\text{m}$ 筛未全通过 | 75 $\mu\text{m}$ 筛未全通过 | 45 $\mu\text{m}$ 筛未全通过 | 均齐度 |

#### 1.3.3.3 均齐度的测定

使用 S3500 激光粒度分析仪测出各谷物粉的  $D_{60}$  和  $D_{10}$ ，根据公式计算均齐度。

$$C_h = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

式中：

$C_h$ ——为均齐度，%；

$D_{60}$ ——为累计粒度分布百分数达到 60% 时所对应的粒径， $\mu\text{m}$ ；

$D_{10}$ ——为累计粒度分布百分数达到 10% 时所对应的粒径， $\mu\text{m}$ 。

#### 1.3.3.4 休止角和平板角的测定

使用 BT-1001 型智能粉体物性测试仪，根据不同的测定指标按说明组装组件，测定各原料的休止角及平板角。

#### 1.3.3.5 流动性指数的计算及评价

根据休止角、平板角等粉体特性指标，计算出均齐度、压缩度结合流动性指数表进行打分并进行流动性评价<sup>[15]</sup>。

### 1.3.4 体外模拟血糖生成指数的测定

#### 1.3.4.1 模拟口腔液的配制

口腔电解质溶液：分别称取 1.126 5 g KCl，0.503 2 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ，1.142 4 g  $\text{NaHCO}_3$ ，0.030 5 g  $\text{MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$ ，0.005 76 g  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ，0.220 5 g  $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ ，用去离子水定容于 1 000 mL 容量瓶中，调 pH 值至 7.0。

口腔液：每 100 mL 口腔电解质中加入 7 500 U 的唾液淀粉酶。

#### 1.3.4.2 模拟胃液的配制

胃电解质溶液：分别称取 3.1 g NaCl，1.1 g KCl，

0.15 g  $\text{CaCl}_2$ ，0.6 g  $\text{NaHCO}_3$ ，去离子水定容于 1 000 mL 容量瓶中，调 pH 值至 2.0。

胃液：150 mL 胃电解质添加 35.4 mg 胃蛋白酶，加入 1.5 mL  $\text{CH}_3\text{COONa}$  缓冲液（1 mol/L，pH 值 5.0）。室温下磁力搅拌 10 min，调 pH 值至 2.0。

#### 1.3.4.3 模拟小肠液的配制

肠电解质溶液：5.4 g NaCl，0.65 g KCl，0.33 g  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，去离子水定容于 1 000 mL 容量瓶中，调 pH 值至 7.0。

胰液：7 g 胰酶溶于 100 mL 去离子水，室温下磁力搅拌 10 min，离心 10 min（4 800 g），取上清液 100 mL。

胆汁液：8 g 3 号胆盐溶于 200 mL 去离子水。

小肠液（400 mL）：100 mL 小肠电解质液，200 mL 胆汁液，100 mL 胰液（按 1:2:1 比例配制），加入 0.8 g 淀粉葡萄糖苷酶，调 pH 值至 7.0。

#### 1.3.4.4 白面包制作工艺

参照柳芳伟等<sup>[16]</sup>的方法制作白面包，冷却后保存。

#### 1.3.4.5 体外模拟消化

参照体外模拟食物消化的标准化方法<sup>[17]</sup>进行调整，取含 150 mg 可利用碳水化合物的样品，加入等质量的口腔消化液旋涡振荡使样品润湿，反应 5 min。加入 10 mL 的胃液，转入溶出杯中在 37 ℃ 下孵育 1 h。胃部模拟消化结束后，加入 NaOH 搅拌均匀，再加入 10 mL 肠液，使消化体系 pH 值 7。于 37 ℃ 下振荡孵育，分别于肠消化阶段 0、20、60、90、120、150、180 min 时间点取样品 100  $\mu\text{L}$ ，立即加入 900  $\mu\text{L}$  无水乙醇灭酶处理，混匀，离心（5 000 r/min，5 min），取上清液 20  $\mu\text{L}$ ，加入葡萄糖试剂盒检测液 1 mL 混匀，37 ℃ 孵育 10 min，测定各时间点消化液中的葡萄糖浓度，绘制水解率曲线<sup>[18]</sup>。

1.3.4.6 体外模拟血糖生成指数的计算

通过绘制水解率-时间曲线,模拟方程,曲线下面积表示食物消化后对血糖的影响。以白面包为参考标准,按照 eGI 与氢化指数 (Hydrogenated Index, HI) 的关系式,定义白面包的 HI 为 100,计算出样品的 eGI 值<sup>[19]</sup>。

$$eGI=0.862HI+8.1981 \quad (3)$$

式中:

eGI——为体外模拟血糖生成指数;

HI——为水解指数,是指被测食物体外水解曲线下面积与等量标准食物(白面包)体外水解曲线下面积之比, %。

1.4 数据处理

实验结果用三次重复实验的平均值与标准差来表示,用 Excel 和 SPSS 20 进行数据整理和显著性分析 ( $P<0.05$ ),作图采用 Origin 2017。

2 结果与讨论

2.1 不同谷物粉的粒径分布

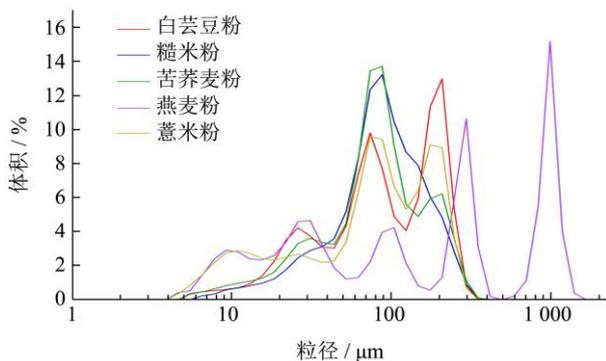


图1 谷物粉粒径分布

Fig.1 Grain size distribution of grain powder

固体颗粒是组成粉体的基本单元,用 S3500 激光粒度分析仪测定的不同粒径区间内的颗粒体积占总量的百分数称为粒度分布。颗粒粒度大、形态致密的粉体通常流动性较好,并且能够有效降低粉体扬尘性,提高粉体溶解性<sup>[20]</sup>,粒径越小说明粉体在水中的分散性能越高,分散的溶液越稳定<sup>[21]</sup>。从粒度分布图曲线坡度及坡峰说可以大致判断粉体的均匀程度,由图 1 可知,燕麦粉的粒径大都分布在 250 μm 和 1 000 μm,出现了两个明显峰值,说明燕麦粉的颗粒大小差异较大,粒径分布不均匀影响其流动性,冲调易结块。苦荞麦粉、薏米粉和白芸豆粉的粒径分布出现两个坡峰但相差不大,说明颗粒分布较均匀。糙米粉粒径大都分布在 90 μm 左右,只有一个坡峰且坡度很陡,表示粒径相差无几,颗粒大小很均匀。

2.2 不同谷物粉的冲调性比较

冲调性与颗粒分布均匀性、粒径大小、润湿时间具有相关性,当颗粒分布均匀且粒径较大时,润湿时间短,冲调性能好<sup>[22]</sup>。由表 2 可以看出谷物粉在 40 °C 水温下的润湿时间都存在显著性差异 ( $P<0.05$ ),其中燕麦粉是 5 种谷物粉中粒径最大、润湿时间最短的,平均粒径为 315.87 μm,润湿时间为 16.86 s。苦荞麦粉粒径最小,润湿时间为 88.75 s,不易溶解。谷物粉润湿时间短说明易冲调,5 种谷物粉润湿时间由短到长依次为:燕麦粉>糙米粉>薏米粉>白芸豆粉>苦荞麦粉,苦荞麦粉最难冲调可能是由于其平均粒径较小,且粒径分布不均匀造成的。

表 2 谷物粉粒径与润湿时间

Table 2 Grain size and wetting time

| 样品   | 平均粒径/μm                  | 润湿时间/s                  |
|------|--------------------------|-------------------------|
| 薏米粉  | 89±2.26 <sup>c</sup>     | 32.58±2.63 <sup>c</sup> |
| 燕麦粉  | 315.87±9.60 <sup>a</sup> | 16.86±2.23 <sup>d</sup> |
| 白芸豆粉 | 100.5±0.44 <sup>b</sup>  | 48.71±7.42 <sup>b</sup> |
| 糙米粉  | 90.51±5.50 <sup>c</sup>  | 32.02±3.48 <sup>c</sup> |
| 苦荞麦粉 | 87.81±1.59 <sup>c</sup>  | 88.75±7.34 <sup>a</sup> |

注:数据为平均值±SD (n=3),同列中不同字母表示有显著性差异 ( $P<0.05$ )。下表同。

2.3 不同谷物粉的粉体流动性比较

粉体流动性是冲调粉产品性能重要指标,提高粉体流动性,对其生产工艺、运输、储存和填充具有重要意义<sup>[23]</sup>。使用 BT-1001 型智能粉体物性测试仪和 S3500 激光粒度分析仪,评价各谷物粉的粉体特性差异。经 2.3 的方法确定了各粉体原料都适用测量均齐度,所以根据粉体粒径的 D<sub>60</sub> 和 D<sub>10</sub> 计算出了各粉体原料的均齐度,由表 3 可以看出燕麦粉的均齐度最大,为 23.61;糙米粉均齐度最小,为 3.29。休止角和平板角最大的都是苦荞麦粉,分别为 52.99 °和 80.16 °,休止角和平板角最小的分别是白芸豆粉和薏米粉,为 48.43 °和 65.65 °。通过松装密度和振实密度计算压缩度,薏米粉的压缩度最大,为 44.02%;苦荞麦粉压缩度最小,为 36.65%。将休止角、平板角、压缩度和均齐度按照流动性指数表的得分标准进行打分,计算出流动性指数,根据流动性指数表分的 7 个等级:最良好 (90~100)、良好 (80~89)、相当良好 (70~79)、一般 (60~69)、不大好 (40~59)、不良 (20~39)、非常差 (0~19) 可以看出燕麦粉的流动性不良,流动性指数仅为 30.5,糙米粉流动性指数为 52,是这些谷物粉中流动性最好的。流动性评分结果由低到高依次为

燕麦粉<薏米粉<白芸豆粉<苦荞麦粉<糙米粉。从表 3 来看, 燕麦粉的流动性最差, 主要是由于均齐度

大造成的, 说明粒径分布不均匀是导致其流动性差的主要原因。

表 3 谷物粉流动性指数

Table 3 Liquidity index of grain flour

| 样品                         | 薏米粉                        | 燕麦粉                        | 白芸豆粉                       | 糙米粉                      | 苦荞麦粉                     |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 休止角/°                      | 56.16±0.13 <sup>a</sup>    | 49.38±2.52 <sup>bc</sup>   | 48.43±0.39 <sup>c</sup>    | 50.66±2.80 <sup>bc</sup> | 52.99±0.14 <sup>b</sup>  |
| 平板角/°                      | 65.65±1.76 <sup>b</sup>    | 79.8±4.23 <sup>a</sup>     | 78.17±1.45 <sup>a</sup>    | 67.28±1.04 <sup>b</sup>  | 80.16±4.58 <sup>a</sup>  |
| 松装密度/(g cm <sup>-3</sup> ) | 0.429 7±0.013 <sup>d</sup> | 0.326±0.001 <sup>e</sup>   | 0.549±0.006 <sup>a</sup>   | 0.503±0.007 <sup>c</sup> | 0.522±0.005 <sup>b</sup> |
| 振实密度/(g cm <sup>-3</sup> ) | 0.765 9±0.005 <sup>d</sup> | 0.551 4±0.004 <sup>e</sup> | 0.888 7±0.001 <sup>a</sup> | 0.802±0.003 <sup>c</sup> | 0.822±0.002 <sup>b</sup> |
| 压缩度/%                      | 44.022±2.71 <sup>a</sup>   | 40.886±0.67 <sup>ab</sup>  | 38.373±0.81 <sup>bc</sup>  | 37.001±0.95 <sup>c</sup> | 36.652±0.49 <sup>c</sup> |
| 均齐度                        | 8.36±0.21 <sup>b</sup>     | 23.61±0.54 <sup>a</sup>    | 5.11±0.01 <sup>c</sup>     | 3.29±0.23 <sup>d</sup>   | 3.75±0.08 <sup>d</sup>   |
| 流动性指数                      | 43                         | 30.5                       | 46                         | 52                       | 49                       |

### 2.4 不同谷物粉的体外消化率比较

采用体外实验的方法对白面包和谷物粉进行模拟消化, 其淀粉水解率分析结果如图 2 所示, 肠模拟消化初始阶段苦荞麦粉的葡萄糖释放速度快, 含量快速增加, 导致淀粉水解率快速上升, 在 20 min 时就达到了 45%, 0~20 min 阶段消化速率最快, 说明含有较多的快消化淀粉; 燕麦粉在 60 min 时就达到了最大水解率, 之后趋于平缓。白芸豆粉的水解率从消化初始阶段一直缓慢上升, 在消化终点才达到 60%, 消化速率最缓慢。薏米粉的水解率曲线也比较平缓, 但最终水解率较高, 达到了 80%。根据结果显示, 反应时间 120 min 时 5 种谷物粉水解率由低到高依次为: 白芸豆粉<薏米粉<糙米粉<燕麦粉<苦荞麦粉。

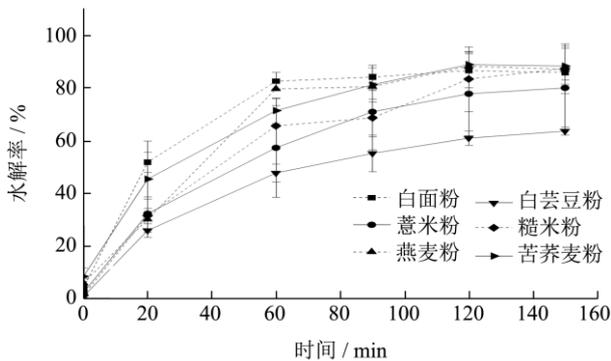


图 2 不同谷物粉体外消化率

Fig.2 External digestibility of different grain powders

### 2.5 不同谷物粉 eGI 的比较

通过计算水解率的曲线下面积得到食物的 HI、eGI 值。eGI 可以在一定程度上反应不同食物对血糖的调控作用<sup>[24]</sup>。结果如表 4 所示, 白芸豆粉的 eGI 为 60.62, 处在 55<eGI<70 范围内, 对餐后血糖反应影响较小; 薏米粉、糙米粉、燕麦粉和苦荞麦粉 eGI 值分别为 73.39、76.24、85.87 和 88.17, 会造成较大的

餐后血糖反应。五种谷物粉 eGI 由低到高依次为: 白芸豆粉<薏米粉<糙米粉<燕麦粉<苦荞麦粉。白芸豆粉的 eGI 最低说明在体外消化的过程中释放的葡萄糖量最少, 可能是白芸豆中影响碳水化合物水解的物质造成的。

表 4 各谷物粉的 HI、eGI

Table 4 HI, eGI of each grain meal

| 样品   | HI                        | eGI                       |
|------|---------------------------|---------------------------|
| 白面包  | 100                       | 94                        |
| 薏米粉  | 75.63±16.02 <sup>bc</sup> | 73.39±13.81 <sup>bc</sup> |
| 燕麦粉  | 90.11±1.90 <sup>ab</sup>  | 85.87±1.64 <sup>ab</sup>  |
| 白芸豆粉 | 60.81±3.71 <sup>c</sup>   | 60.62±3.20 <sup>c</sup>   |
| 糙米粉  | 78.94±5.01 <sup>ab</sup>  | 76.24±4.32 <sup>ab</sup>  |
| 苦荞麦粉 | 92.77±6.39 <sup>a</sup>   | 88.17±5.50 <sup>a</sup>   |

## 3 结论

通过对 5 种谷物粉粒径分布的比较, 发现燕麦粉平均粒径最大、润湿时间最短, 但其粒径分布图出现了多个明显峰值, 粒径分布很不均匀; 其他四种谷物粉原料粒径分布比较均匀, 大都分布在 73.99~209.3 μm, 但苦荞麦粉润湿时间较长, 不易冲调。流动性评价结果显示, 燕麦粉流动性最差可能是其粒径分布差异较大造成的, 不便于生产传输; 糙米粉的流动指数为 52, 是这些谷物粉中流动性最好的, 其次是苦荞麦粉和白芸豆粉, 分别为 49 和 46, 可以用于新产品研发。体外模拟消化的试验结果显示, 五种谷物粉 eGI 由低到高依次为: 白芸豆粉<薏米粉<糙米粉<燕麦粉<苦荞麦粉。白芸豆粉的体外消化率曲线上升最缓慢, 反应终点时的水解率也比其他 4 种谷物粉低, eGI 值为 60.62 比较适合糖尿病产品的研发。

通过对 5 种市售冲调粉的粉体特性研究和体外消化评价, 发现白芸豆粉是一种粉体流动性较好, 方便冲调且体外模拟血糖生成指数较低的产品, 这是一种

可直接冲泡食用的谷物熟粉,也可用于和其他原料复配,研发营养更全面的代餐粉。

### 参考文献

- [1] 洪雁,顾娟,顾正彪.体内外实验测定荞麦淀粉消化特性[J].食品科学,2010,31(5):293-297.
- [2] 李楠,张良,刘倩楠,等.膳食纤维对饼干体外消化速率的抑制作用[J].现代食品科技,2020,36(8):110-116.
- [3] 欧怡,袁鹏,谢勇丽.个性化饮食治疗处方在2型糖尿病治疗中的应用[J].现代医院,2019,19(8):1209-1211.
- [4] 田文静,罗红霞,林少华,等.代餐粉的研究进展[J].食品科技,2020,45(9):95-101.
- [5] Ruth N, Shannon O M, Natassia R, et al. It's no has bean: A review of the effects of white kidney bean extract on body composition and metabolic health [J]. *Nutrients*, 2020, 12(5): 1398.
- [6] Ha D T, Trung T N, Thu N B, et al. Adlay seed extract (*Coix lachryma-jobi* L.) decreased adipocyte differentiation and increased glucose uptake in 3T3-L1 cells [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2010, 13(6): 1331-1339.
- [7] Aoe S, Ichinose Y, Kohyama N, et al. Effects of high  $\beta$ -glucan barley on visceral fat obesity in Japanese individuals: A randomized, double-blind study [J]. *Nutrition*, 2017, 42: 1-6.
- [8] Ma Y, Rang Y, Yang R, et al. Effect of white kidney bean extracts on estimated glycemic index of different kinds of porridge [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2018, 96: 576-582.
- [9] Mann, Jim. Meta-analysis of low-glycemic index diets in the management of diabetes [J]. *Diabetes Care*, 2003, 26(12): 3351-3365.
- [10] Jenkins D J A, Wolever T M S, Kalmusky J, et al. Low glycemic index carbohydrate foods In the management of hyperlipidemia [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1985, 42(4): 604-617.
- [11] 费永涛,郑文雄,陈燕清,等.代餐粉特性及加工生产的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(9):3557-3564.
- [12] 林心健,夏旭东,戚向阳,等.体外消化对油茶蒲提取物抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的影响[J].核农学报,2022,36(2):376-383.
- [13] 丁方莉,柳嘉,林静,等.食物血糖应答测试方法研究进展[J].食品工业科技,2021,42(1):355-362.
- [14] Ahmed J, Thomas L, Arfat Y A. Functional, rheological, microstructural and antioxidant properties of quinoa flour in dispersions as influenced by particle size [J]. *Food Research International*, 2019, 116(FEB.): 302-311.
- [15] 樊鹏帅,杨宗玲,王俊,等.桑叶提取物压片糖果粉体造粒工艺优化[J].食品与发酵工业,2022,48(9):179-185.
- [16] 柳芳伟,张珊珊,陈苏明,等.3种富含多糖面包的体外消化酵解特性[J].食品科学,2021,42(3):143-149.
- [17] Andr e Brodkorb, Lotti Egger, Marie Alming, et al. Infogest static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. *Nature Protocols*, 2019, 14(4): 991-1014.
- [18] Ahmed, And, Segal, et al. Fermentation of dietary starch in humans [J]. *The American Journal of Gastroenterology*, 2000, 95(4): 1017-1020
- [19] Chinedum E, Sanni S, Theresa N, et al. Effect of domestic cooking on the starch digestibility, predicted glycemic indices, polyphenol contents and alpha amylase inhibitory properties of beans (*Phaseolis vulgaris*) and breadfruit (*Treculia africana*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106: 200-206.
- [20] 郑博妍,范丽影,郝佳,等.红曲色素粉体干法制粒工艺研究[J].食品与发酵工业,2021,47(17):148-155.
- [21] 易建华,张志婕,朱振宝,等.不同粒径对黑米粉理化性质的影响[J].陕西科技大学学报,2021,39(1):39-44.
- [22] Fang Y, Selomulya C, Chen X D. On measurement of food powder reconstitution properties [J]. *Drying Technology*, 2007, 26(1): 3-14.
- [23] 刘苑琳,张凤兵,柳志杰,等.改善易吸湿粉体流动性的研究进展[J].食品工业,2020,41(5):258-260.
- [24] Martina, Foschia, Donatella, et al. Mastication or mastication: Does the preparation of sample affect the predictive *in vitro* glycemic response of pasta? [J]. *Starch - Strke*, 2014, 66(11-12): 1096-1102.