

# 复配多糖延缓面团消化及降低餐后血糖的作用

张玉荣, 戴利君, 张久亮\*

(华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430000)

**摘要:** 为研究复配多糖对面团消化及餐后血糖的影响, 通过体外模拟胃肠消化实验筛选效果优良的自然多糖进行复配, 探究不同多糖复配组对淀粉消化相关酶的体外抑制作用并测定多糖-面团体系的质构特性, 最后以小鼠餐后血糖实验进行效果验证。结果表明: 从10种不同来源的天然多糖中筛选确定添加量之比均为2:2:1的黄芪多糖、灰树花多糖、桦褐孔菌粗多糖复配组合(命名为: 黄芪复配组)及黄花菜多糖、灰树花多糖、桦褐孔菌粗多糖复配组合(命名为: 黄花菜复配组)延缓面团消化的效果最好。黄芪复配组及黄花菜复配组均能抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性, 抑制的 $IC_{50}$ 值分别为13.65  $\mu\text{g/mL}$ 和10.63  $\mu\text{g/mL}$ 。质构数据显示多糖复配组可能限制面团中淀粉面筋网络的形成, 抑制其消化速率。餐后血糖动物实验显示黄花菜复配组降低小鼠餐后血糖的效果最佳, 黄芪复配组的降糖效果与阳性药阿卡波糖相当。结果证明, 复配多糖可以延缓面团消化及降低餐后血糖。

**关键词:** 多糖; 复配; 面团; 体外消化; 餐后血糖

文章编号: 1673-9078(2024)02-44-53

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.2.1586

## Compound Polysaccharides Retards Dough Digestion and Reduce Postprandial Blood Sugar

ZHANG Yurong, DAI Lijun, ZHANG Jiuliang\*

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** To investigate the effects of compound polysaccharides on dough digestion and postprandial blood glucose, natural polysaccharides with superior effects were screened through *in vitro* simulated gastrointestinal digestion experiments. The inhibitory effects of different compound polysaccharide groups on starch digestion-related enzymes were explored *in vitro*, and the textural properties of the polysaccharide-dough systems were determined. Finally, postprandial blood glucose experiments were conducted in mice for verification. The results showed that among the 10 kinds of natural polysaccharides, the combination of *Astragalus membranaceus* polysaccharides, *Grifola frondosa* polysaccharides, *Inonotus obliquus* crude polysaccharides (amount ratio, 2:2:1; named “the compound *Astragalus membranaceus* polysaccharide group”), and the combination of *Hemerocallis citrina* polysaccharides, *Grifola frondosa* polysaccharides, *Inonotus obliquus* crude polysaccharides (amount ratio, 2:2:1; named “the compound *Hemerocallis citrina* polysaccharide group”) were the best for delaying dough digestion. Both the compound *Astragalus membranaceus* polysaccharide group and the compound *Hemerocallis citrina* polysaccharide group inhibited the activity of  $\alpha$ -glucosidase with their  $IC_{50}$  values of inhibition were 13.65  $\mu\text{g/mL}$  and 10.63  $\mu\text{g/mL}$ , respectively. The texture data showed that the compound polysaccharides might restrict the formation of starch-gluten network and inhibit the digestion rate. The postprandial blood glucose experiments in mice showed that the

引文格式:

张玉荣,戴利君,张久亮.复配多糖延缓面团消化及降低餐后血糖的作用[J].现代食品科技,2024,40(2):44-53.

ZHANG Yurong, DAI Lijun, ZHANG Jiuliang. Compound polysaccharides retards dough digestion and reduce postprandial blood sugar [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 44-53.

收稿日期: 2022-12-16

作者简介: 张玉荣 (1998-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 1403893900@qq.com

通讯作者: 张久亮 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然活性成分研究与功能食品开发, E-mail: zjl\_ljz@mail.hzau.edu.cn

reducing effect of the compound *Hemerocallis citrina* polysaccharide group on the postprandial blood glucose of mice was the greatest, and the hypoglycemic effect of the compound *Astragalus membranaceus* polysaccharide group was comparable to that of the positive control (drug acarbose). Thus, the compound polysaccharides can delay dough digestion and lower postprandial blood sugar.

**Key words:** polysaccharides; complexes; dough; *in vitro* digestion; postprandial glucose

糖尿病是一种慢性代谢性疾病, 长期血糖控制不佳可能会出现各种急、慢性并发症, 引起脑、心、肾、血管、神经的损害, 对患者的身心健康造成严重伤害, 甚至会导致死亡。根据国际糖尿病联盟的数据, 我国糖尿病患者人数超过 1.4 亿, 仍将不断增加<sup>[1]</sup>。为减少糖尿病的发病风险, 控制机体血糖稳态是预防及治疗糖尿病的关键。人体进食碳水化合物后, 淀粉在  $\alpha$ -淀粉酶和  $\alpha$ -葡萄糖苷酶等消化吸收关键酶的作用下分解产生葡萄糖, 从而导致血液中血糖浓度上升。餐后血糖长期维持高水平可能影响人体糖耐受能力, 降低餐后血糖对减少高血糖人群继而发展成糖尿病的风险和降低糖尿病并发症发生的几率都起到了必要作用。

鉴于糖尿病和餐后高血糖的严重性和目前治疗药物带来的副作用, 在药食同源的植物中寻找安全、高效的天然活性成分逐渐成为干预餐后高血糖研究的新方向。天然多糖种类繁多且已被证实具有降血糖、抗氧化、抗炎等生物活性<sup>[2]</sup>, 其中植物多糖如黄芪多糖、黄花菜多糖、山药多糖、党参多糖、海藻多糖<sup>[3-7]</sup>、灰树花多糖、茯苓多糖、姬松茸多糖、羊肚菌多糖和桦褐孔菌多糖等药食同源真菌多糖<sup>[8-12]</sup>在降低血糖方面发挥调节作用。由于不同来源的天然多糖降解血糖的效果和程度不一, 调节不同多糖添加量形成的复配多糖可能在一定程度上呈现协同作用<sup>[13]</sup>。然而目前市面上关于复配多糖调节餐后血糖的报道较少。

因此, 本研究的主要目的在于借助体外模拟胃肠消化模型对黄芪多糖、黄花菜多糖等 10 种天然多糖进行复配筛选, 比较不同多糖复配组对面团模拟消化吸收的效果, 通过  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的酶活抑制实验和质构测定探究多糖复配组体外延缓面团消化的作用机制, 筛选效果最佳的复配多糖组进行小鼠餐后血糖实验, 旨在为复配多糖降低餐后血糖水平提供理论支撑与应用可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

动物: 健康 SPF 级昆明小鼠, 雄性, 体质量

18~22 g, (购于华中农业大学实验动物中心, 许可证号: SCXK(鄂)2020-0019)。

材料: 黄芪多糖(纯度 90%)、灰树花多糖(纯度 50%)、姬松茸多糖(纯度 50%)、羊肚菌多糖(纯度 50%), 西安瑞迪生物科技有限公司; 黄花菜多糖(纯度  $\geq 60\%$ ), 西安瑞禾生物科技有限公司; 茯苓多糖、山药多糖、党参多糖、海藻多糖(纯度均为 50%), 陕西川久生物科技有限公司; 桦褐孔菌粗多糖, 湖北迅奥健康科技有限公司; 体积分数 60% 乙醇多次浸提得到的桦褐孔菌醇沉多糖组分(IOP60), 实验室前期制备所得; 中筋小麦面粉, 安琪酵母股份有限公司。

试剂: 阿卡波糖(纯度  $> 99\%$ ), 对硝苯基- $\alpha$ -D-吡喃葡萄糖苷, DNS 试剂, 上海源叶生物科技有限公司; 胃蛋白酶(BR, 1:3 000), 胰蛋白酶(BR, 1:250), 粘蛋白(BR, 牛颌下腺),  $\alpha$ -淀粉酶(From porcine pancreas, type VI-B, 活力  $\geq 5 000$  U/g),  $\alpha$ -葡萄糖苷酶(From *Saccharomyces cerevisiae*, 活力  $\geq 10 000$  U/g), 美国 Sigma-Aldrich 有限公司; 其它试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

HMJ-A20E1 和面机, 小熊电器股份有限公司; SartoPB-21pH 计, 德国赛多利斯股份有限公司; ALPHA 1-4LD 真空冷冻干燥机, 德国 Marin Christ 公司; SHA-C 恒温水浴摇床, 亿能实验仪器厂; UV1700 紫外分光光度计, 苏州岛津仪器有限公司; 活力型罗氏罗康全血糖仪、活力型罗康全血糖试纸, 德国罗氏诊断公司。

### 1.3 多糖-面团体系制备

称取一定量的小麦粉, 控制小麦粉和多糖总质量为 150 g, 用 75 g 纯水溶解多糖粉, 在和面机中搅拌 10 min, 最终获得空白面团和多糖面团, 用于体外实验。取一部分空白面团均匀分割成  $2 \text{ cm}^3$  左右的方形, 放在蒸屉上蒸制 20 min 熟化, 拿出冷却、冻干并磨制成粉供小鼠餐后血糖实验使用。

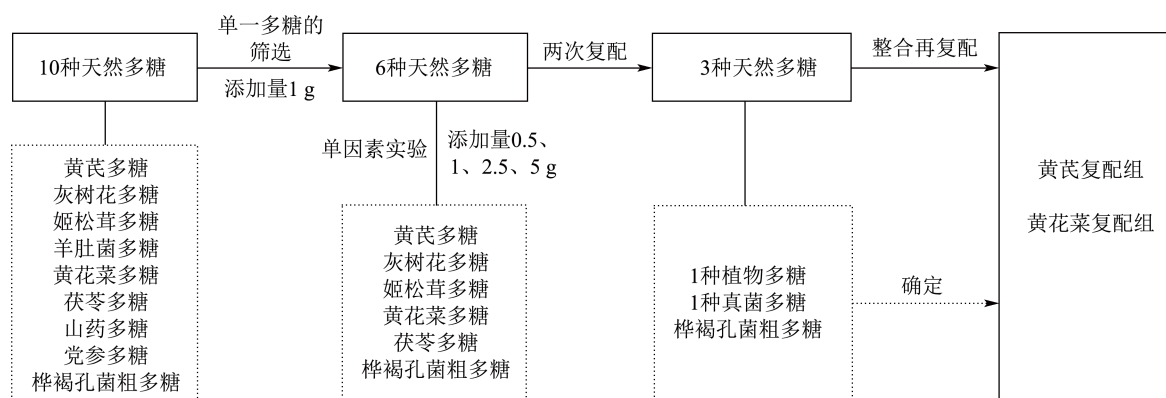


图 1 10 种多糖筛选流程简图

Fig.1 Flow chart of screening ten polysaccharides

## 1.4 相关指标测定

### 1.4.1 体外模拟消化实验筛选多糖

#### 1.4.1.1 体外模拟胃肠消化

参考 Tagliazucchi 等<sup>[14]</sup>的方法并略作修改, 制备模拟唾液、模拟胃液、模拟肠液后取待测样品约 1.0 g, 按料液比 1:4 (g/mL) 加入模拟唾液 4 mL, 在 37 °C 下水浴震荡 100 r/min 消化 3 min 进行模拟口腔消化实验; 加入 20 mL 模拟胃液, 37 °C 下水浴震荡 100 r/min 消化 2 h 进行胃消化实验; 用 NaHCO<sub>3</sub> 调节溶液 pH 值至 7.0, 再加入 4.5 mL 模拟肠液, 调节 pH 值为 7, 加入 2 mL α-葡萄糖苷酶液进行肠消化实验, 37 °C 下水浴震荡 100 r/min, 消化 2 h 后立即冷却终止反应。在消化时间为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h 时, 分别从反应液中取出 2.0 mL 上清液作为肠消化后样品, 加入 3 mL 无水乙醇在 4 °C 下 4 000 r/min 离心 10 min, 4 °C 保存备用。用 DNS 比色法<sup>[15]</sup>测定上清液中游离葡萄糖的质量浓度。面团消化的抑制率按公式 (1) 计算:

$$Y = \frac{C_{\text{多糖}} - C_{\text{空白}}}{C_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Y—抑制率, %;

$C_{\text{多糖}}$ —表示多糖-面团体系中葡萄糖的释放质量浓度, mg/mL;

$C_{\text{空白}}$ —表示空白面团中葡萄糖的释放质量浓度, mg/mL。

#### 1.4.1.2 多糖筛选

控制多糖粉和小麦粉的总质量为 150 g, 在添加多糖量为 1 g 时, 比较 10 种多糖对面团消化的影响, 筛选出延缓面团消化效果较佳的 6 种多糖; 再通过单因素实验将筛选出来的样品多糖

按照不同的比例进行复配及模拟胃肠消化二次筛选, 确定效果最佳的多糖复配组。图 1 为多糖筛选流程简图。

#### 1.4.2 主要活性物质的含量测定

采用福林酚法<sup>[16]</sup>测定总多酚的质量分数; 采用苯酚硫酸法<sup>[17]</sup>测定总多糖的质量分数; 制作葡萄糖标准曲线, 将待测多糖溶液稀释至适当浓度, 用 DNS 比色法测定游离葡萄糖的质量分数。

#### 1.4.3 复配多糖对 α-葡萄糖苷酶的抑制

方法参照 Wang 等<sup>[18]</sup>并做一定修改。配制不同质量浓度 (0、5、10、20、30、40 和 50 μg/mL) 的单一多糖及复配多糖溶液, 在 96 孔板中加入 40 μL 样品溶液和 20 μL 0.25 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液, 于 37 °C 培养箱中孵育 10 min 后加入 40 μL 0.5 mmol/L 的对硝苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷溶液, 在 37 °C 培养箱孵育 20 min 后加入 0.1 mL 的 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液终止反应, 在 405 nm 处测定吸光度。以阿卡波糖作为阳性对照, 磷酸盐缓冲液作为空白对照, 样品对 α-葡萄糖苷酶的抑制率按公式 (2) 计算:

$$D = \left(1 - \frac{A_{\text{sample}} - A_{\text{blank}}}{A_{\text{test}} - A_{\text{control}}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

D—α-葡萄糖苷酶抑制率, %;

$A_{\text{sample}}$ —是样品组的吸光度值;

$A_{\text{blank}}$ —是不加酶样品的吸光度值;

$A_{\text{test}}$ —是空白组吸光度值;

$A_{\text{control}}$ —是不加酶空白吸光度值。

利用 SPSS 22.0 软件计算样品的半数抑制浓度 (Half Maximal Inhibitory Concentration, IC<sub>50</sub>)。

### 1.4.4 多糖-面团的质构测定

面团的制备过程见 1.3。将蒸熟的多糖面团制成 30 mm×30 mm 的圆柱体样品备用，平放于圆柱形探头的正下方进行 TPA 测试。使用 P/36 型探头，TPA 测试的条件为：测前速度 2.0 mm/s，测试速度 1.0 mm/s，测后速度 1.0 mm/s，触发力 5.0 g，压缩比为 50%。

### 1.4.5 小鼠的餐后血糖测定

SPF 级昆明雄性小鼠自由进食普通饲料及纯水，适应性喂养 3 d 后根据体重将 32 只小鼠随机分组，每组 8 只小鼠。实验流程及分组给药情况如图 2 和表 1 所示：血糖检测开始前，断粮不断水 16 h。按照

每 0.5 min 灌胃一只小鼠的速度，对空白对照组、阳性对照组、黄芪复配组和黄花菜复配组小鼠分别灌胃（以小鼠体质量计）蒸馏水、阿卡波糖（20 mg/kg）、黄芪多糖复配溶液（1 000 mg/kg，黄芪多糖：灰树花多糖：桦褐孔菌多糖=2:2:1）和黄花菜多糖复配溶液（1 000 mg/kg，黄花菜多糖：灰树花多糖：桦褐孔菌多糖=2:2:1），期间严格把控灌胃速度。给予样品 30 min 后，各小鼠按 4 g/kg 剂量灌胃空白面团冻干粉溶液，并于灌胃后使用罗氏活性血糖仪在 0、15、30、60、90 和 120 min 测定尾静脉血糖水平，并计算 120 min 内的血糖曲线下面积（Area Under Curve, AUC）。

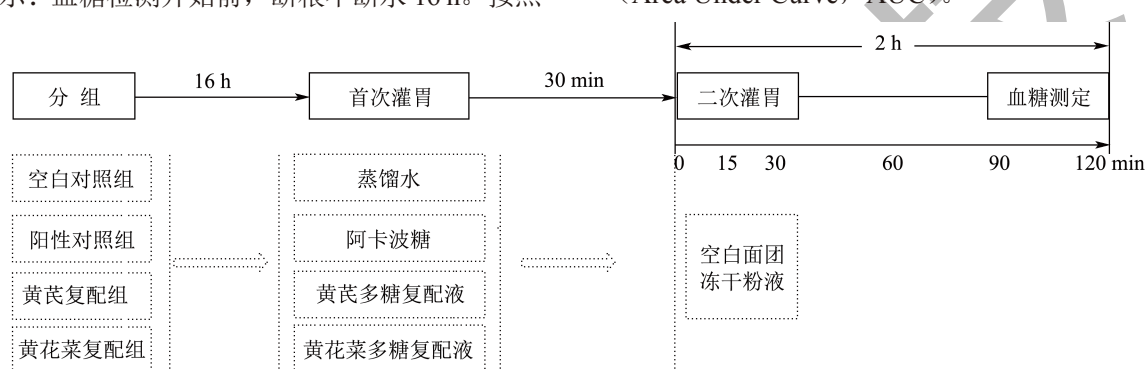


图 2 餐后血糖实验流程简图

Fig.2 Flow diagram of postprandial blood glucose experiment

表 1 小鼠的分组及给药情况

Table 1 Grouping and administration of mice

分组	首次灌胃内容物	灌胃剂量 (mg/kg, 以体质量计)	二次灌胃 内容物	灌胃剂量 (g/kg, 以体质量计)
空白对照组	蒸馏水	20	空白面团冻 干粉溶液	4
阳性对照组	阿卡波糖			
黄芪复配组	黄芪多糖复配液 (黄芪多糖:灰树花 多糖:桦褐孔菌多糖=2:2:1)	1 000		
黄花菜复配组	黄花菜多糖复配液 (黄花菜多糖:灰树花 多糖:桦褐孔菌多糖=2:2:1)			

### 1.5 数据统计分析

数据采用平均值 (Mean)±标准差 (SD) 的形式表示，运用 SPSS 22.0、Origin 9.0 等软件处理分析数据，使用 ANOVA 方差分析和 Duncan 多重比较对数据进行显著性差异分析， $P<0.05$  时差异显著， $P<0.01$  时差异极显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 多糖的筛选及复配

#### 2.1.1 相同添加量的单一多糖对面团消化的影响

控制多糖和小麦粉的总质量为 150 g，在添加多糖

量为 1 g 时，比较 10 种不同来源的多糖对面团消化的影响，结果如图 3 所示。为了避免多糖中可能含有的游离葡萄糖对结果的干扰，以葡萄糖释放质量浓度为研究指标，用任一时间点的葡萄糖浓度减去消化时间为 0 h 时的葡萄糖质量浓度。当体外消化时间持续 0.5 h 时，可以看到黄花菜多糖组和姬松茸多糖组的葡萄糖质量浓度为 0.057 mg/mL 和 0.622 mg/mL，与葡萄糖质量浓度为 2.318 mg/mL 的空白组存在显著差异 ( $P<0.05$ )，黄芪多糖组的消化抑制效果次之；体外消化时间持续 1.0 h 时，黄花菜多糖组的葡萄糖仍处于低质量浓度水平，为 1.413 mg/mL，显著低于空白组的 4.409 mg/mL ( $P<0.05$ )。在 0.5 h 到 1.0 h 这个

时间段, 桦褐孔菌粗多糖组的葡萄糖质量浓度变化量为10组中最小, 表明桦褐孔菌粗多糖对面团消化具有极强的抑制作用。体外消化2.5~3.0 h时间段, 空白组葡萄糖释放质量浓度变化量仅1.897 mg/mL, 空白组面团的消化基本完成。在体外消化2.0 h及之后, 黄芪多糖组、黄花菜多糖组、灰树花多糖组、姬松茸多糖组、茯苓多糖组和桦褐孔菌粗多糖组的葡萄糖释放质量浓度均显著低于空白组 ( $P < 0.05$ ), 且3.0 h时黄芪多糖组的葡萄糖释放质量浓度最低。故后续实验选择上述6种多糖作为材料进行延缓面团消化的量效关系研究。

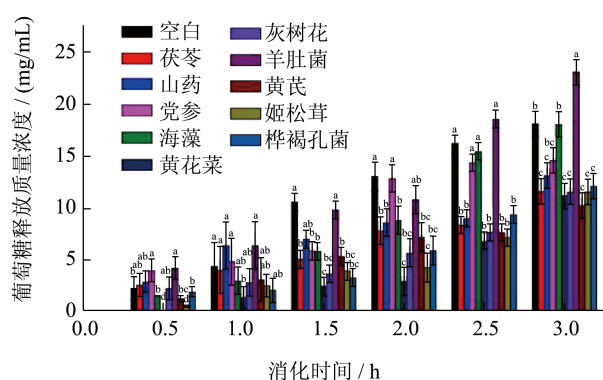


图3 不同来源的多糖添加量为1 g时对面团消化的影响  
Fig.3 Effect of the addition of different sources of polysaccharides at 1 g on the digestion of dough

注: 不同字母表示同一时间的不同样品之间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。图4~8同。

## 2.1.2 不同添加量的多糖对面团消化的影响

### 2.1.2.1 桦褐孔菌粗多糖对面团消化的影响

图4a是不同添加量的桦褐孔菌粗多糖对面团消化的影响。在各个时间段, 添加量为0.5 g的粗多糖面团的葡萄糖释放质量浓度显著低于空白面团 ( $P < 0.05$ ), 且在0.5 h和1.0 h时释放质量浓度最低。粗多糖添加量为0.5 g和1.5 g的面团在1.5 h和2.0 h时葡萄糖释放质量浓度无显著差异。根据实验室前期已有的基础<sup>[12]</sup>和图4a的结果, 图4b比较桦褐孔菌粗多糖和IOP60组分添加量为0.5 g时对面团消化的作用效果。在整个肠道模拟消化过程中, IOP60面团和桦褐孔菌粗多糖面团的葡萄糖释放量除0.5 h外均显著低于空白面团 ( $P < 0.05$ )。消化结束时, 空白组的葡萄糖释放质量浓度为18.12 mg/mL, 粗多糖组抑制率能达到26.88%, 两种组分之间不存在显著差异。这也证明添加0.5 g桦褐孔菌粗多糖已经能够显著降低面团中葡萄糖的释放量。由

于桦褐孔菌原材料多为进口, 经过提取得到一定含量的粗多糖所需的成本也远大于本研究中其他植物、真菌多糖, 故后续复配时将其添加量确定为0.5 g, 不再研究其与面团消化的量效关系。

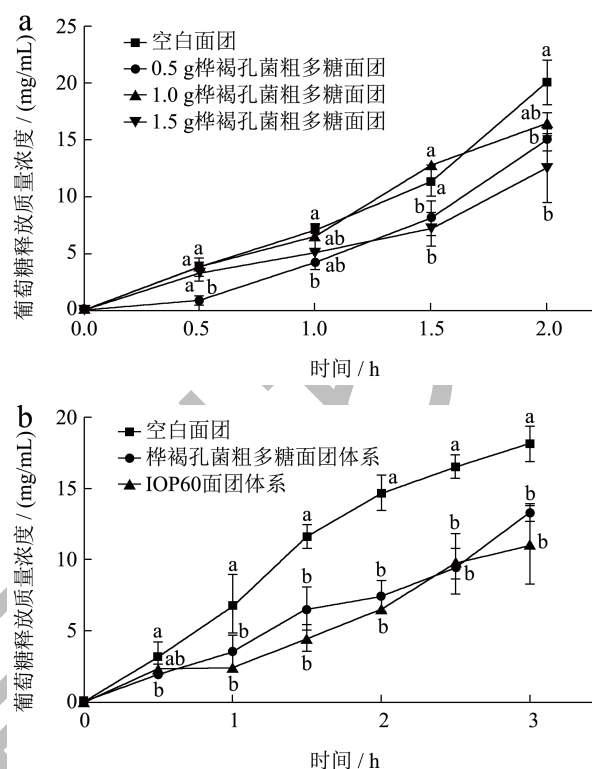


图4 桦褐孔菌粗多糖和IOP60对面团消化的影响  
Fig.4 Effects of *Inonotus obliquus* crude polysaccharides and IOP60 on the digestion of dough

注: (a) 不同添加量的桦褐孔菌粗多糖对面团消化的影响, (b) 桦褐孔菌粗多糖和IOP60组分添加量为0.5 g时对面团消化的影响。

### 2.1.2.2 五种多糖对面团消化的影响

黄芪多糖、黄花菜多糖、灰树花多糖、姬松茸多糖和茯苓多糖添加量为0.5、1、2.5和5 g时对面团中葡萄糖释放的影响如图5所示。正常人群餐后血糖的峰值一般出现在摄入食物后30 min, 对血糖峰值及其上升速率的控制是调控人体血糖稳态的关键<sup>[19]</sup>。面团置于模拟胃液中开始分解, 如图5a, 30 min时, 黄花菜添加量为1 g的面团葡萄糖释放量最低, 相较空白组降低68.3%, 对延缓峰值出现效果最显著 ( $P < 0.05$ ), 其次是添加量为0.5、2.5、5 g的黄花菜面团, 依次较空白对比降低了23.34%、63.21%和43.92%。根据图5b中葡萄糖释放质量浓度的趋势可知, 黄芪多糖的添加与其延缓面团消化呈现一定量效关系, 添加5 g的黄芪

多糖在胃液消化的前 1 h 及肠液消化的 2 h 时均能显著抑制葡萄糖释放 ( $P < 0.05$ ), 且在黄芪多糖的各添加量中抑制效果最佳。灰树花多糖对面团的效果如图 5c, 其添加量对延缓面团消化的效果基本呈现质量浓度剂量效应, 面团葡萄糖释放质量浓度随灰树花多糖添加量的增多而逐渐下降。从图 5d、e 可知, 姬松茸多糖组在添加量为 5 g 时对葡萄糖生成的抑制率极高, 除 1.0 h 的时间点均与空白组形成极显著的差别 ( $P < 0.01$ )。茯苓多糖对面团消化的抑制效果不如其他多糖组, 其添加量未与抑制效果形成明显量效关系, 但在 0.5、1.5 和 3.0 h 时能够与空白组形成显著差异 ( $P < 0.05$ ), 该结果与刘宇帆<sup>[20]</sup>的研究中得到茯苓多糖可以抑制淀粉消化的结果基本一致。

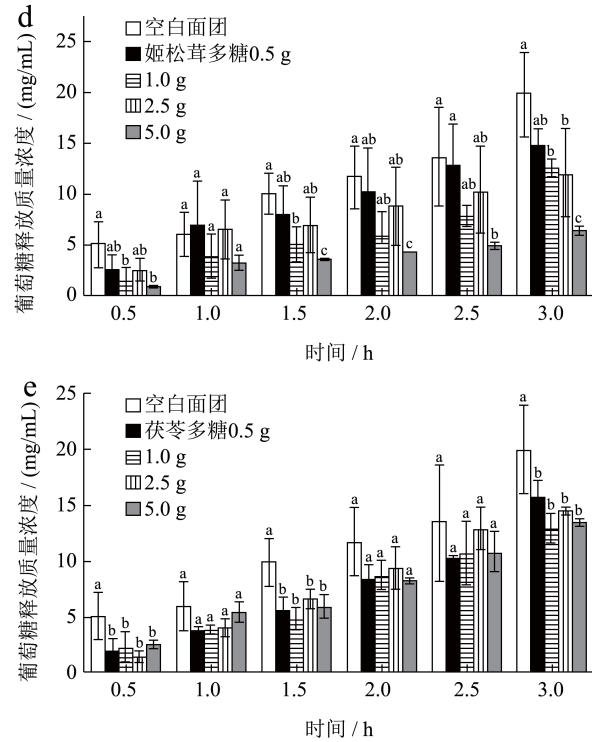
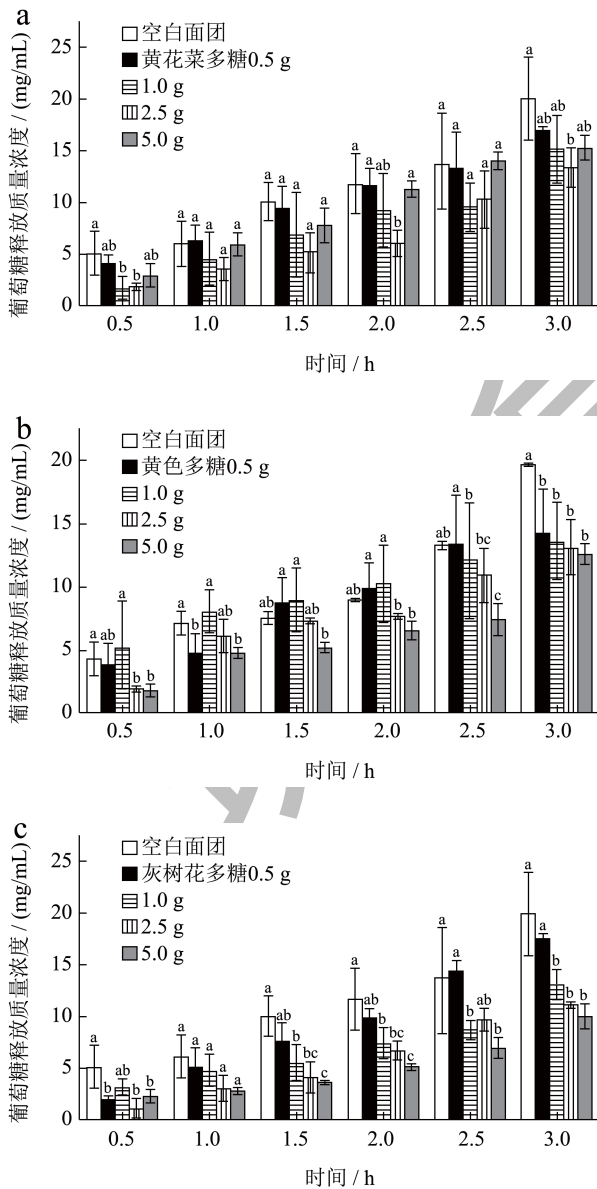


图 5 不同添加量的 5 种多糖对面团消化的影响

Fig.5 Effects of different additions of five polysaccharides on the digestion of dough

### 2.1.3 不同添加量和比例的复配多糖对面团消化的影响

在 2.1.1 结果的基础上选择 3 种多糖 (1 种植物多糖、1 种真菌多糖和一定的桦褐孔菌粗多糖) 进行复配, 图 6a 为第一次按 2:2:1 质量比复配的实验结果。添加了黄芪多糖的复配组称为黄芪复配组, 添加了黄花菜多糖的复配组称为黄花菜复配组。将效果最好的黄芪多糖与灰树花多糖、桦褐孔菌粗多糖复配, 总添加量为 2.5 g 的黄芪复配面团的葡萄糖释放质量浓度远低于总添加量为 1.25 g 的复配组, 且在 1 h 和 1.5 h 时存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 说明黄芪复配组添加量与葡萄糖释放质量浓度呈现明显的剂量效应, 这与 2.1.2 的结果吻合。在 0.5 h 和 1 h 时, 总添加量相同的黄芪复配面团对体外消化的抑制效果优于姬松茸复配面团, 且存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 这也证实黄芪复配组对面团消化抑制作用有一定的影响。

图 6b 是在第一次复配的基础上设置不同添加量的二次复配结果。添加量为 2.0 g 的黄芪多糖搭配灰树花多糖的复配组对面团消化的抑制最明显, 在 3 h 时葡萄糖释放质量浓度低达 7.066 mg/mL, 抑制率为 61.70%。黄花菜复配组葡萄糖释放质量浓度始终低于空白组, 并在 1、2 和 3 h 时与其存在

显著差异 ( $P < 0.05$ ), 同时在 0.5 h 和 1 h 的释放质量浓度处于极低状态, 对面团消化有一定的影响。

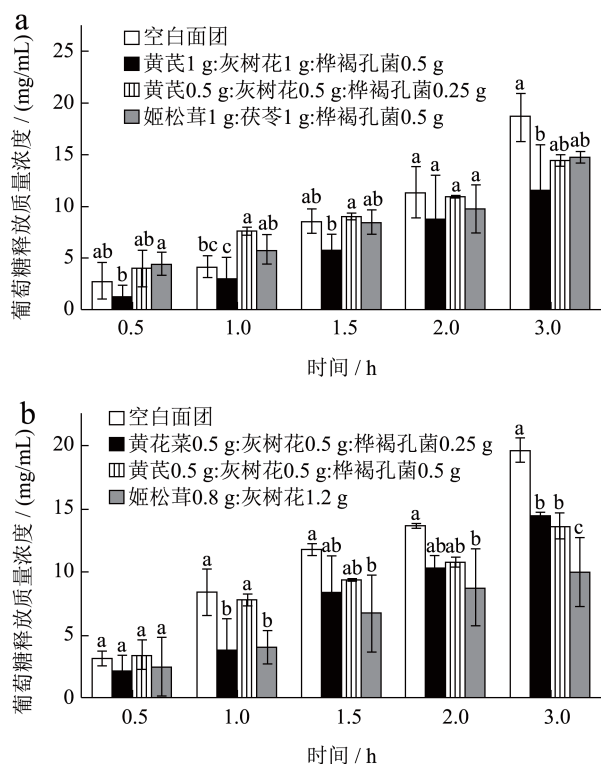


图6 不同添加量和比例的多糖复配组合对面团消化的影响

Fig.6 Effect of different combinations and ratios of polysaccharide additions on dough digestion

#### 2.1.4 复配多糖组合的确定

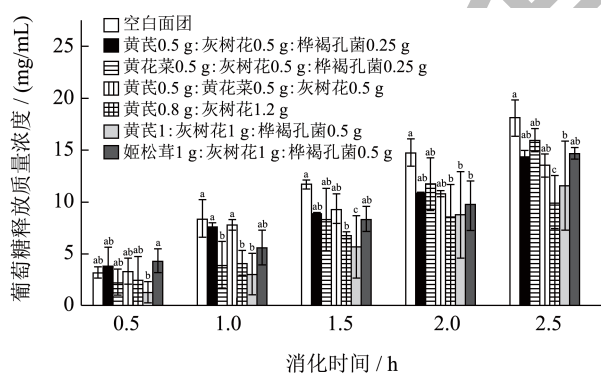


图7 6个效果较好的复配组合对面团消化的影响

Fig.7 Effect of six effective compound combinations on dough digestion

整合多次复配的结果并选择6个效果较好的复配组合进行下一步研究。如图7所示, 除0.5 h, 总添加量为2.5 g的黄芪复配组葡萄糖释放浓度显著低于空白组 ( $P < 0.05$ ), 且在前90 min是6个复配组中抑制效果最强的。添加量为2 g的黄芪多糖和灰树花多糖作为对照组可以证明桦褐孔菌粗多糖在面团消化前期具有较好的抑制作用。正常人

群餐后血糖的峰值出现在餐后0.5~1.0 h之间<sup>[21]</sup>, 在此时间段, 总添加量为1.25 g的黄花菜复配组对面团消化的抑制效果仅次于黄芪复配组。综上所述, 黄芪多糖、灰树花多糖、桦褐孔菌多糖复配组(黄芪复配组)和黄花菜多糖、灰树花多糖、桦褐孔菌多糖复配组(黄花菜复配组)为体外模拟胃肠道消化筛选出来的最佳组合, 添加的质量比为2:2:1。

#### 2.2 主要提取物活性成分含量

通过体外模拟消化实验筛选出的2个复配组中桦褐孔菌提取物、黄芪提取物、黄花菜提取物和灰树花提取物中主要活性成分的质量分数见表2。由表2可知4种提取物均为总多糖质量分数最高, 总多酚次之, 游离还原糖最少。尤其黄芪提取物和灰树花提取物中总多糖质量分数超过50%。

2.1.2的结果显示桦褐孔菌提取物在低添加量能够抑制面团消化, 除了多糖的作用, 多酚类物质也可能发挥协同作用。研究发现桦褐孔菌多酚类物质如原儿茶酸、没食子酸、芦丁等具有降血糖活性<sup>[22]</sup>, 其中没食子酸可通过氢键/疏水作用力与淀粉相互作用并且降低淀粉消化率<sup>[23]</sup>。灰树花和黄芪提取物中总多糖含量超过50%, 远高于其他研究材料的多糖含量, 推断可能是其对抑制面团消化吸收效果更好的原因。有研究表明黄芪提取物和灰树花多糖对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶具有较强的抑制作用, 抑制机理为非竞争性抑制<sup>[24-26]</sup>。黄花菜提取物中多糖含量经测定仅为总质量的31.30%, 多酚含量为12.50%, 高于黄芪和灰树花。多酚和淀粉消化酶的相互作用可以直接抑制淀粉酶的活性从而减缓淀粉的消化、减少葡萄糖的释放<sup>[27]</sup>。

表2 不同提取物的活性成分质量分数

Table 2 Active ingredient content of different extracts (% , n=3)

提取物	桦褐孔菌	黄芪	黄花菜	灰树花
游离还原糖	9.65 ± 0.81	1.42 ± 0.04	11.95 ± 0.66	0.41 ± 0.01
总多酚	38.50 ± 1.01	8.00 ± 0.03	12.50 ± 0.05	9.50 ± 0.81
总多糖	45.73 ± 1.32	54.36 ± 1.89	31.30 ± 1.28	62.90 ± 2.05

#### 2.3 $\alpha$ -葡萄糖苷酶体外抑制实验

$\alpha$ -葡萄糖苷酶具有调节糖代谢的作用, 是水解食物中淀粉的关键酶之一<sup>[28]</sup>。 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂可以抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性延缓淀粉吸收, 降低血糖。图8为黄芪复配组、黄花菜复配组和阳性对照阿卡波糖对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制结果。黄芪复

配组和黄花菜复配组对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶均有一定的抑制作用,且2个复配组对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制呈剂量依赖性趋势,都高于阳性对照组,均能延缓单糖的吸收,降低餐后血糖,这与陈思羽的研究结果一致<sup>[29]</sup>。在质量浓度为  $5 \mu\text{g/mL}$  时,黄花菜复配组和黄芪复配组对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率达到 23.18% 和 21.18%。有研究指出黄芪中黄酮类成分如毛蕊异黄酮、2,4'-二羟基-4-甲氧基二氢查耳酮对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶具有良好的抑制活性<sup>[30,31]</sup>。

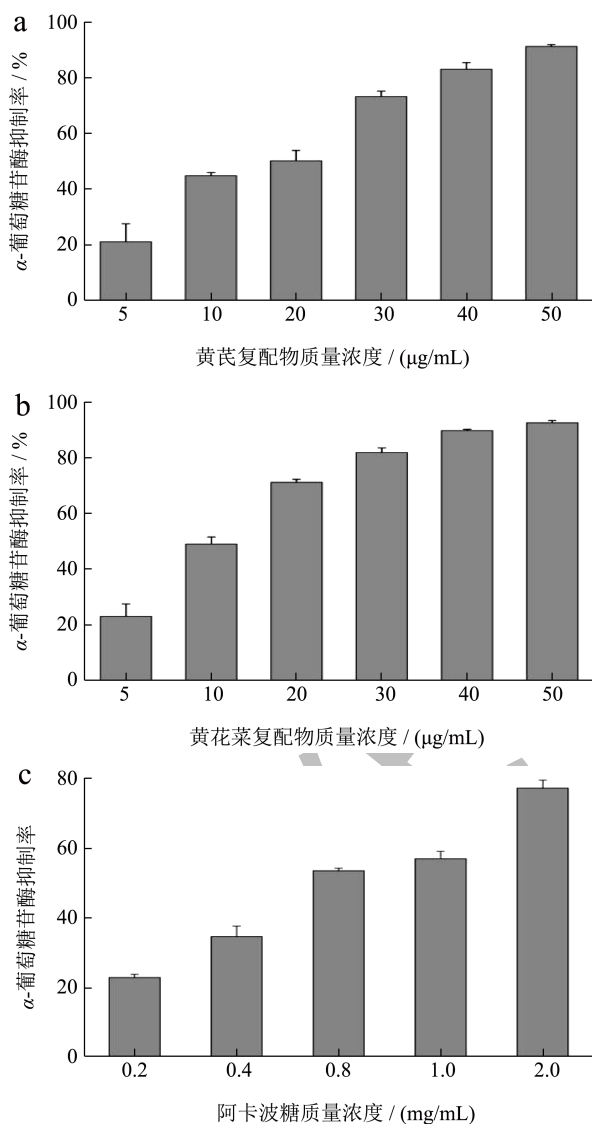


图8 不同样品对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制

Fig.8 Inhibition of  $\alpha$ -glucosidase by different samples

表3 不同复配多糖对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制的  $\text{IC}_{50}$  值

Table 3  $\text{IC}_{50}$  values of different samples for  $\alpha$ -glucosidase inhibition

样品	$\text{IC}_{50}$
黄芪复配组/ $\mu\text{g/mL}$	$13.65 \pm 1.14$
黄花菜复配组/ $\mu\text{g/mL}$	$10.63 \pm 1.03$
阿卡波糖/ $\text{mg/mL}$	$0.70 \pm 0.16$

$\text{IC}_{50}$  为抑制剂的半数抑制质量浓度,可以作为样品抑制效果强弱的判断依据<sup>[32]</sup>。表3显示的是不同复配多糖对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制的  $\text{IC}_{50}$  结果。阿卡波糖作为阳性对照,可延缓吸收有效降低餐后血糖<sup>[33]</sup>。样品组的抑制效果均好于阿卡波糖,其中黄芪复配组  $\text{IC}_{50}$  值为  $13.65 \mu\text{g/mL}$ ,黄花菜复配组  $\text{IC}_{50}$  值最低,为  $10.63 \mu\text{g/mL}$ ,是阿卡波糖抑制效果的 65.85 倍,数据表明黄花菜复配组对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制能力最强,能最大程度的减慢葡萄糖的吸收速率。两个多糖复配组对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶都具有良好的抑制作用,可进一步研究其在体内对餐后血糖值的影响。

## 2.4 多糖-面团的质构测定

不同多糖-面团组的质构参数如表4所示。和空白组相比,黄芪面团和黄花菜面团的硬度分别增加 32.47% 和 43.71%,咀嚼性和黏着性也在增加,且黄花菜面团与空白组存在着显著差异 ( $P < 0.05$ ),弹性在减小,黏聚性在增加,但变化不明显。黄芪面团和黄花菜面团的硬度变化的原因可能是多糖粉改变了面团中麦胶蛋白和麦谷蛋白的交联结构,阻碍面筋网络的形成,面团的硬度增加<sup>[34]</sup>,咀嚼性也增加。黏着性的增加与面筋形成有关,多糖粉的加入影响面筋的形成,面团无法形成光滑表面<sup>[35]</sup>。同时黏聚性增加、回复性降低的原因可能是多糖的粘性较强,增强了对淀粉的包裹能力,使面筋网络更加紧密,或者可能覆盖在面筋网络上阻碍了淀粉的消化,葡萄糖释放量随之减少。

## 2.5 复配多糖对小鼠餐后血糖的影响

餐后血糖值可以评判样品对血糖控制的疗效。不同样品对小鼠的餐后血糖值见图9a。除黄花菜复配组的血糖峰值在 15 min 外,空白对照组、黄芪复配组和阿卡波糖组在 30 min 时达到血糖最大值 17.3、16.0 和 13.6 mmol/L。与空白对照组比较,黄芪复配组和黄花菜复配组均显著降低灌胃 30 min 的血糖峰值水平,阿卡波糖在前 30 min 前控制血糖效果最好。各组别达到峰值后开始下降,其中黄花菜复配组的曲线斜率最大,其次是黄芪复配组。灌胃面团粉后 60 min 时,各组小鼠的血糖值按从高到低的顺序排列为:空白对照组 15.0 mmol/L、黄芪复配组 12.9 mmol/L、阿卡波糖组 12.1 mmol/L、黄花菜复配组 10.7 mmol/L,黄花菜复配组的降血糖效果已经优于阳性药组;灌胃后 90 min 时,黄花



菜复配组小鼠的血糖值为 8.0 mmol/L, 显著低于空白组的 13.7 mmol/L ( $P < 0.05$ )。灌胃后 120 min 各组小鼠的血糖值同空白组相比, 均存在统计学差异 ( $P < 0.05$ )。观察曲线可知, 复配组曲线过顶点后的斜率更大, 小鼠血糖值达峰以后开始迅速下降, 表明复配多糖在小鼠体内发挥极强的抑制面团消化吸收的作用, 从而使餐后血糖值整

体降低, 这与 2.1.4 实验结果对应。血糖曲线下面积 AUC 如图 9b 所示, 复配组和阳性对照组的 AUC 均低于空白组, 表明在胃肠糖负荷情况下, 复配组具有抑制胃肠对葡萄糖的吸收作用<sup>[36]</sup>。且黄花菜复配组 AUC 降低 25.08%, 阿卡波糖组降低 19.50%, 这也印证图 8a 中黄花菜复配组降低血糖的能力最佳。

表 4 不同多糖-面团组的质构参数

Table 4 Textural parameters of different polysaccharide-dough groups

样品	硬度/g	弹性	咀嚼性/g	黏聚性	黏着性	回复性
空白面团	2 425.80 ± 858.65 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.12 <sup>a</sup>	1 895.88 ± 885.95 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.03 <sup>a</sup>	2 089.40 ± 781.61 <sup>a</sup>	0.53 ± 0.08 <sup>a</sup>
黄芪面团	3 591.94 ± 552.99 <sup>ab</sup>	0.84 ± 0.06 <sup>a</sup>	2 690.32 ± 288.83 <sup>ab</sup>	0.90 ± 0.02 <sup>a</sup>	3 214.39 ± 499.00 <sup>ab</sup>	0.52 ± 0.05 <sup>a</sup>
黄花菜面团	4 309.24 ± 1299.56 <sup>b</sup>	0.83 ± 0.06 <sup>a</sup>	3 097.53 ± 852.32 <sup>b</sup>	0.87 ± 0.03 <sup>a</sup>	3 765.18 ± 1 176.72 <sup>b</sup>	0.52 ± 0.03 <sup>a</sup>

注: 同一列上标字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

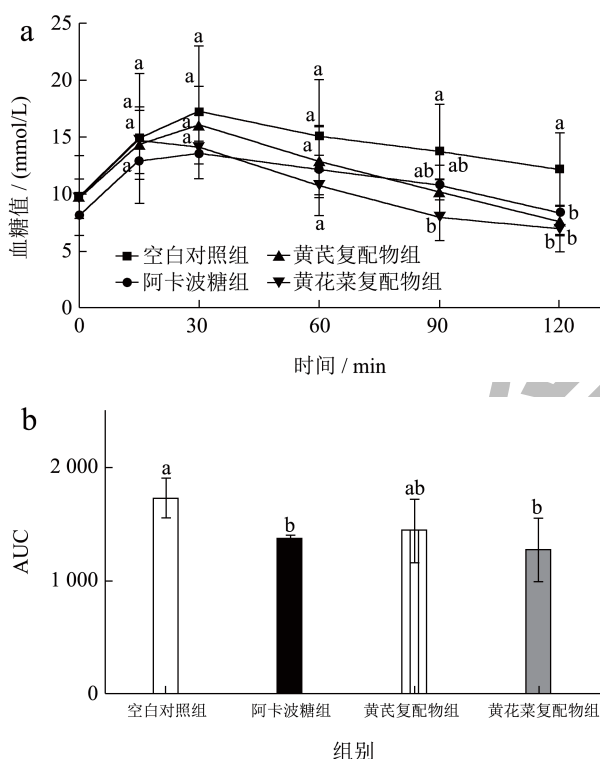


图 9 不同样品对小鼠餐后血糖值的影响及相应的曲线下面积

Fig.9 Effects of different samples on postprandial blood glucose values of mice and the corresponding AUC

注: 图 a 中折线上不同字母表示同一时间的不同样品之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 图 b 中柱上不同字母表示不同组别之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 3 结论

综上所述, 通过体外消化模拟实验, 筛选并确定了复配组的成分和比例, 从 10 种不同来源的天然多糖中筛选出黄花菜多糖、姬松茸多糖、灰树花多糖、桦褐孔菌多糖、黄芪多糖和茯苓多糖 6 种对

面团消化抑制作用强的多糖; 再通过不同添加量和比例的多糖-面团体系消化实验选出效果最佳的黄芪复配组和黄花菜复配组, 质量比均为 2:2:1。黄芪复配组和黄花菜复配组对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制呈现剂量依赖性效应, 均延缓葡萄糖的吸收速率。质构分析显示多糖提取物的加入使面团的 TPA 特性出现一定改变, 多糖可能通过与淀粉中面筋蛋白发挥作用等形式改变淀粉分子交联结构, 影响面团中淀粉的消化特性。动物实验表明黄芪复配组和黄花菜复配组抑制淀粉消化的效果良好, 能延缓小鼠灌胃淀粉餐后血糖的上升, 血糖曲线下面积 AUC 也明显降低。本研究所得的复配多糖能够起到降低餐后血糖的作用, 为食品、药品领域的应用提供理论基础。

### 参考文献

- [1] TÖNNIES T, RATHMANN W, HOYER A, et al. Quantifying the underestimation of projected global diabetes prevalence by the International Diabetes Federation (IDF) Diabetes Atlas [J]. *BMJ Open Diabetes Research & Care*, 2021, 9(1): e002122.
- [2] 徐涵, 刘云, 阙欢. 天然多糖提取纯化及生理功能活性研究进展 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(5): 1382-1390.
- [3] CHAN J Y, LAM F, LEUNG P, et al. Antihyperglycemic and antioxidative effects of a herbal formulation of *Radix astragali*, *Radix codonopsis* and *Cortex lycii* in a mouse model of type 2 diabetes mellitus [J]. *Phytotherapy Research*, 2009, 23(5): 658-665.
- [4] 欧丽兰, 余昕, 张椿, 等. 黄花菜多糖的提取工艺及抗肿瘤活性研究 [J]. *四川农业大学学报*, 2016, 34(2): 201-205.
- [5] LIANG X, HUANG Y, CHEN J, et al. Antioxidant activity of polysaccharides in yam bulbils and their hypoglycemic

- effect in diabetic mice [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(7): 1332-1335.
- [6] LUAN F, JI Y, PENG L, et al. Extraction, purification, structural characteristics and biological properties of the polysaccharides from *Codonopsis pilosula*: A review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 261: 117863-117863.
- [7] SORAYA S, SAEIDEH M, POUYA H, et al. Molecular mechanisms underlying cancer preventive and therapeutic potential of algal polysaccharides [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2019, 25(11): 1210-1235.
- [8] OUYANG Y Z, NIE J P, GAO X X, et al. *Grifola frondosa* polysaccharide ameliorates hyperglycemia and gut microbiota in type 2 diabetic mice [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2022, 180: s65.
- [9] WANG H J, SHI S S, WANG S C. Can highly cited herbs in ancient traditional Chinese medicine formulas and modern publications predict therapeutic targets for diabetes mellitus? [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 213: 101-110.
- [10] WANG H, FU Z M, HAN C C. The medicinal values of culinary-medicinal royal sun mushroom (*Agaricus blazei* Murrill) [J]. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2013, 2013(19): 842619-842624.
- [11] REHMAN A U, SDDIQUI N Z, FAROOQUI N A, et al. *Morchella esculenta* mushroom polysaccharide attenuates diabetes and modulates intestinal permeability and gut microbiota in a type 2 diabetic mice model [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 984695-984695.
- [12] 夏晴,王箴言,王玉,等.桦褐孔菌多糖对糖尿病小鼠的干预作用及机制[J].*中国食品学报*,2021,21(3):71-78.
- [13] 张博华,张明,范祺,等.三种食用菌多糖及其复合多糖功能性评价研究[J].*中国果菜*,2021,41(6):74-79.
- [14] TAGLIAZUCCHI D, VERZELLONI E, BERTOLINI D, et al. *In vitro* bio-accessibility and antioxidant activity of grape polyphenols [J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(2): 599-606.
- [15] 梁存权.比色法测定植物多糖含量方法概述[J].*北方药学*,2011,8(12):4,86.
- [16] 何巧丽,李柯翱,季志红,等.甜叶菊中总多酚及总多糖含量测定[J].*西部中医药*,2016,29(5):34-36.
- [17] 毛淑敏,许家珍,周帅飞,等.苯酚-硫酸法联合DNS法测定金银花不同花期多糖的含量[J].*中南药学*,2015,13(1): 65-67.
- [18] WANG C, LI W W, CHEN Z Q, et al. Effects of simulated gastrointestinal digestion *in vitro* on the chemical properties, antioxidant activity,  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory activity of polysaccharides from *Inonotus obliquus* [J]. *Food Research International*, 2018, 103: 280-288.
- [19] TANG T P, LI Q, HUANG Z W, et al. Evaluation of Shandong pancake with sourdough fermentation on the alleviation of type 2 diabetes symptoms in mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 90:104952.
- [20] 刘宇帆.茯苓聚糖碱水解物的制备及其对淀粉消化性能的影响[D].天津:天津科技大学,2021.
- [21] 郎江明,陈苹,魏爱生,等.新诊断2型糖尿病患者24小时血糖的波动特点[J].*中华糖尿病杂志*,2005,1:46-48.
- [22] ZHENG W, ZHANG M, ZHAO Y, et al. Accumulation of antioxidant phenolic constituents in submerged cultures of *Inonotus obliquus* [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(3): 1327-1335.
- [23] 蒋晴怡.苦荞中淀粉-槲皮素低消化体形成机制的研究[D].上海:上海应用技术大学,2021.
- [24] 陈玉胜,张李阳.黄芪水提取物对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的抑制及其降血糖作用[J].*南京晓庄学院学报*,2012,28(3):72-75.
- [25] 鲁梅芳,金玉妍,曹小红,等.灰树花胞外多糖主要成分GFP-1对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用[J].*中国新药杂志*, 2009,18(23): 2250-2254.
- [26] 刘力萍,吴天祥,张宗启.灰树花胞外粗多糖脱色工艺优化及对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制作用的影响[J].*中国酿造*, 2018,37(7):145-149.
- [27] ZAMORA-ROS R, KNAZE V, ROTHWELL J A, et al. Dietary polyphenol intake in Europe: the European prospective investigation into cancer and nutrition (EPIC) study [J]. *European Journal of Nutrition*, 2016, 55(4): 1359-1375.
- [28] DESHMUKH S K, GUPTA M K, AGRAWAL S. Antidiabetic agents from fungi with special reference to  $\alpha$ -glucosidase inhibitors [J]. *Recent Patents on Biotechnology*, 2023, 17(1): 24-61.
- [29] 陈思羽,唐思梦,王颖,等.黄芪多糖对2型糖尿病模型大鼠餐后1 h血糖的影响[J].*中药新药与临床药理*,2020, 31(4):396-401.
- [30] 邱琳,肖朝江,董相,等.长果颈黄芪根中抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性成分研究[J].*大理大学学报*,2017,2(4):1-5.
- [31] 韩玲玲.毛蕊异黄酮和毛蕊异黄酮苷对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用及其机制研究[D].太原:山西医科大学,2022.
- [32] BAG A, GHORAI P K. Development of quantum chemical method to calculate half maximal inhibitory concentration (IC<sub>50</sub>) [J]. *Molecular Informatics*, 2016, 35(5): 199-206.
- [33] MOHAN S, ESKANDARI R, PINTO B M. Naturally occurring sulfonium-ion glucosidase inhibitors and their derivatives: a promising class of potential antidiabetic agents [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2014, 47(1): 211-225.
- [34] PU H, WEI J, WANG L, et al. Effects of potato/wheat flours ratio on mixing properties of dough and quality of noodles [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 76: 236-242.
- [35] 孔晓雪,王爱,丁其娟,等.高膳食纤维面团粉质特性与面包烘焙特性的研究[J].*食品科学*,2013,34(17):111-115.
- [36] 顾员印,丁淑梅,孙翠翠,等.白凤菜对机体糖耐量影响的研究[J].*中国畜牧兽医*,2017,44(5):1547-1551.