

不同多糖/多酚体外消化酵解特性及其面条的研制

亓瑾瑾, 钟亚东, 胡婕伦*

(南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 中国-加拿大食品科学与技术联合实验室, 江西省生物活性多糖重点实验室, 江西南昌 330047)

摘要: 为开发含多糖多酚的血糖调控健康产品, 该研究以葛根多糖 (*Pueraria lobata* Polysaccharides, PLPS) 和莲子多糖 (Lotus Seed Polysaccharides, LSPS), 以赤小豆多酚 (Adzuki Bean Polyphenols, ABPP) 和绿豆多酚 (Mung Bean Polyphenols, MBPP) 为研究对象, 构建体外消化酵解模型, 研究其理化特性、体外消化与酵解规律及体外 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制活性, 并基于以上研究结果, 利用多糖与多酚对面条配方进行优化设计。结果表明, PLPS 的总糖 ($858.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和糖醛酸含量 ($220.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 显著高于 LSPS (655.36 、 $151.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), ABPP 的总酚 ($54.23 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$) 和总黄酮 ($18.07 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$) 显著高于 MBPP (39.29 、 $8.34 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$)。体外消化过程中多糖未被分解, 多酚含量增加 $1.87 \sim 2.42$ 倍, 体外酵解后多糖和多酚含量分别降低 $53.52\% \sim 57.15\%$ 和 $35.21\% \sim 43.53\%$, pH 值降低 $13.84\% \sim 25.71\%$, 短链脂肪酸含量增加 $1.52 \sim 2.43$ 倍。此外, 四种成分均能抑制两种酶活性。进一步通过配方优化, 开发出具有较低蒸煮损失率 (6.31%) 与断条率 (9.54%) 的面条配方 (全麦粉 100 g 、水 50 g 、PLPS 和 LSPS 0.6 g 、ABPP 和 MBPP 0.6 g 、食盐 2 g)。综上, 四种多糖多酚均具有 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制活性, 且消化促进多酚释放, 肠道菌群代谢能有效利用四种物质但存在差异, 以此开发的优质面条配方, 为血糖调控主食的开发提供了参考。

关键词: 多糖; 多酚; 体外消化; 体外酵解; 面条开发

文章编号: 1673-9078(2026)07-140-150

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0650

In vitro Digestion and Fermentation Characteristics of Selected Polysaccharides and Polyphenols and Their Application in Noodle Development

QI Jinjin, ZHONG Yadong, HU Jielun*

(National Key Laboratory of Food Science and Resource Mining at Nanchang University, China Canada Joint Laboratory of Food Science and Technology, Key Laboratory of Bioactive Polysaccharides of Jiangxi Province, Nanchang 330047, China)

Abstract: To develop blood glucose-regulating health products enriched with polysaccharides and polyphenols, *Pueraria lobata* polysaccharides (PLPS), lotus seed polysaccharides (LSPS), adzuki bean polyphenols (ABPP), and mung bean polyphenols (MBPP) were evaluated using an *in vitro* digestion and fermentation model. Physicochemical properties, simulated digestion and fermentation patterns, and inhibitory activities against α -amylase and α -glucosidase were investigated. Based on these results, a noodle formulation was optimized and designed using polysaccharides and polyphenols. The results showed that PLPS had significantly higher total sugar ($858.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) and uronic acid content ($220.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) than LSPS (655.36 and $151.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively),

引文格式:

亓瑾瑾, 钟亚东, 胡婕伦. 不同多糖/多酚体外消化酵解特性及其面条的研制[J]. 现代食品科技, 2026, 42(7): 140-150.

QI Jinjin, ZHONG Yadong, HU Jielun. *In vitro* digestion and fermentation characteristics of selected polysaccharides and polyphenols and their application in noodle development [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 140-150.

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-07-15; 接受日期: 2025-07-20

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目 (32222065); 江西省重点研发计划项目 (20223BBF61023); 食品科学与资源挖掘全国重点实验室目标导向项目 (SKLF-ZZA-202211)

作者简介: 亓瑾瑾 (1999), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品资源开发, E-mail: Jasin7@163.com

通讯作者: 胡婕伦 (1988), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品营养、肠道微生态, E-mail: hujielun@ncu.edu.cn

whereas ABPP had significantly higher total phenolics (54.23 mg GAE·g⁻¹) and flavonoids (18.07 mg GAE·g⁻¹) than MBPP (39.29 and 8.34 mg GAE·g⁻¹, respectively). During *in vitro* digestion, polysaccharides were not decomposed, whereas polyphenol content increased by 1.87- to 2.42-fold. After *in vitro* fermentation, polysaccharide and polyphenol contents decreased by 53.52%~57.15% and 35.21%~43.53%, respectively, pH value decreased by 13.84%~25.71%, and short-chain fatty acid content increased by 1.52- to 2.43-fold. Additionally, all four components exhibited inhibitory effects on both enzymes. After further optimization, a noodle formulation with low cooking loss (6.31%) and breaking (9.54%) rates was developed, comprising water (50 g), PLPS and LSPS (0.6 g), ABPP and MBPP (0.6 g), and salt (2 g). In conclusion, the four polysaccharides and polyphenols exhibited inhibitory activities against α -amylase and α -glucosidase, with digestion promoting polyphenol release, thereby allowing gut microbiota to utilize the four compounds effectively yet differently. The high-quality noodle formulation developed in this study provides a reference for the development of blood glucose-regulating staple foods.

Key words: polysaccharides; polyphenols; *in vitro* digestion; *in vitro* fermentation; noodle development

作为天然植物活性成分, 多糖和多酚可通过抑制消化酶活性、延缓葡萄糖吸收、调节肠道菌群代谢并促进短链脂肪酸生成等机制, 发挥稳定血糖的作用^[1,2], 因而在食品科学与营养学领域备受关注。多糖是单糖经糖苷键连接的高分子聚合物, 多酚则是含酚羟基的植物次生代谢产物, 其结构特性影响生物利用度与功能活性^[3]。然而, 目前对不同来源多糖和多酚在消化过程中的动态变化仍缺乏系统比较, 这限制了其在高附加值功能性食品中的应用。

近年来, 体外模拟消化和酵解模型被广泛应用于研究多糖和多酚的代谢行为。研究表明, 多糖在口腔、胃和小肠消化阶段的含量通常保持稳定, 可抑制消化酶活性, 有助于延缓淀粉消化, 显著降低餐后血糖水平^[4]。其在结肠酵解过程中可被肠道菌群选择性利用, 产生短链脂肪酸等有益代谢物, 不仅能直接抑制肝脏糖异生, 还能通过激活肠道 L 细胞分泌 GLP-1, 增强胰岛素敏感性^[5]。多酚类物质的释放过程主要发生于胃部与肠道消化阶段, 酸性环境和消化酶可促进其从植物基质中溶出, 不仅能够减轻机体的氧化损伤程度, 同时有助于维持血糖水平的动态平衡。其酚羟基能够选择性地与 α -淀粉酶和葡萄糖苷酶的催化位点结合, 进而抑制葡萄糖分子的生成^[6]。

随着糖尿病等代谢性疾病发病率攀升, 开发具有辅助调节血糖的主食替代品成为食品工业的重要方向。目前, 国内外研究主要通过使用全谷物食材、添加多糖类膳食纤维、植物多酚或功能性多糖来降低食品的血糖生成指数 (GI)。例如, 茶多酚添加质量分数为 0.5% 可使面包中快速消化淀粉减少 45%^[7]。然而, 现有辅助调节血糖的食品仍面临口感差、加工适应性低等问题。面条作为全球主食之一, 其质构特性 (如蒸煮损失率、断条率) 易受功能性成分添加的影响^[8]。如何挖掘与利用新型功能因子开发适口的健康功能食

品, 是当前研究的热点。

前期研究与文献调研表明, 葛根多糖 (PLPS)、莲子多糖 (LSPS)、赤小豆多酚 (ABPP) 和绿豆多酚 (MBPP) 是食药同源食材中潜在的具有降血糖活性功能因子^[9-12], 而对其消化酵解和体内外血糖调控功能的完整探索和评价, 深入研究这些功能因子, 针对性地开发“食药同源”食材, 为开发兼具维持血糖稳态功效和良好适口性的功能性主食, 本研究旨在系统比较 PLPS、LSPS、ABPP 和 MBPP 在体外消化-酵解过程中的动态变化, 阐明其对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制率。通过单因素和正交实验优化面条配方, 确定了最佳工艺, 有利于开发与利用新型功能因子。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

葛根, 江西省奉新县锐健农业科技有限公司; 莲子, 江西省广昌县君志食品有限公司; 赤小豆, 江西井冈山粮油集团有限公司; 绿豆, 江西天拓实业有限公司; 耐高温淀粉酶 α -淀粉酶 (A109182)、糖化酶 (A107823), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 猪胆粉 (KL71020), 上海康朗生物科技有限公司; 胃蛋白酶 (P6887)、胰酶 (P1750)、吐温 80 (P1754) 刃天青 (R7017), 购于美国 Sigma 化学公司; 菊粉标准品、淀粉葡萄糖苷酶, 爱尔兰 Megazyme 公司; α -淀粉酶 (S35763-1ku)、 α -葡萄糖苷酶 (S10050-100U)、透析袋 (8 000~14 000Da), 上海源叶生物科技有限公司; 无水乙醇、咔唑、考马斯亮蓝、阿卡波糖, 广州西陇科学股份有限公司; Folin-Phenol 试剂、芦丁标准品、没食子酸标准品、DNS 试剂、食盐, 北京索莱宝生物科技有限公司, 全麦粉, 江西谷邑丰食品科技有限公司。

1.2 仪器与设备

XS205DU 分析天平, 美国 Mettler toledo 公司; COY-02 厌氧培养手套箱, 美国 COY 公司; N-1100 旋转蒸发仪, 日本东京理化器械株式会社; Labconco FreeZone 冷冻干燥机, 美国 LABCONCO 公司; FE20 pH 计, 梅特勒-托利多国际贸易有限公司; Varioskan Flash 3001 全波长多功能酶标仪, 美国 Thermo Scientific 公司; 7890 B 气相色谱仪, 美国 Agilent 公司; YXQ-LS 高压蒸汽灭菌锅, 上海博迅实业有限公司; ST16R 高速冷冻离心机, 美国 Thermo Scientific 公司; MJ-KM18Q5-401J 家用多功能面条机, 美的集团; KN680 全自动凯氏定氮仪, 济南阿尔瓦仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 多糖多酚的提取

葛根和莲子原料分别烘干粉碎, 采用 $\varphi=95\%$ 乙醇 (1:20, m/V) 脱脂脱色, 离心除乙醇 90 °C 下热水浸提 2 h (1:20, m/V)。上清液合并滤渣浸提液, 旋蒸浓缩, 依次加入原料质量分数 2% 的耐高温淀粉酶 (pH 值 6.5, 95 °C, 2 h)、2% 糖化酶 (pH 值 4.5, 60 °C, 1 h)、1% 木瓜蛋白酶 (pH 值 4.5, 60 °C, 2 h) 处理, 灭酶并冷却。上清液缓慢加入 95% 乙醇 (1:5.33, φ), 静置过夜, 离心复溶除乙醇, 透析 (8 000~14 000 Da) 24 h, 浓缩冻干备用。

赤小豆与绿豆样品分别粉碎烘干, 加入 $\varphi=80\%$ 乙醇 (1:20, m/V), 50 °C 加热搅拌 60 min, 2 572×g 离心 10 min 取上清。沉淀重复此提取过程 3 次, 合并提取液, 真空旋转蒸发至析出脂溶性成分, 再次离心去除沉淀和脂溶性成分后取上清, 冻干备用。

1.3.2 多糖多酚基本成分测定

冻干后所得物料质量与原料质量之比为得率。采用苯酚-硫酸法测定中性糖含量、硫酸-咔唑法测定糖醛酸含量^[13]。中性糖与糖醛酸含量之和即总糖含量。参照史建鑫等的福林酚比色法, 测定总酚含量^[14]。采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ 比色法测定总黄酮含量^[15]。

1.3.3 体外消化模拟消化液的配制及其消化过程

基于 INFOGEST 2.0^[16]方法, 配置模拟唾液, 胃液和肠液 (分别为 SSF、SGF 和 SIF) 的储备溶液。模拟口腔消化: 添加 SSF、 $\text{Ca}_2\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_2$ 溶液, 将 pH 值调整至 7.0, 再加入 α -淀粉酶溶液, 避光反应 2 min (37 °C)。模拟胃中消化: 向口腔消化后样品加入 SGF、 $\text{Ca}_2\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_2$ 溶液, 将 pH 值调整至 3.0, 加入胃蛋白酶溶液, 反应 6 h。模拟肠中消化: 经胃部消化结束后, 加入 SIF 和

$\text{Ca}_2\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_2$ 溶液, 将 pH 值调整至 7.0, 加入胰酶溶液和胆汁, 反应 2 min。

1.3.4 体外消化后多糖多酚基本成分的测定

取上述模拟消化样液, 4 800×g 离心 10 min, 过 0.22 μm 水系滤膜, 多糖多酚含量测定方法同 1.3.2。采用二硝基水杨酸法 (DNS) 测定还原糖含量。上清液 pH 值用 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 调至 7 后, 取 1 mL 与 0.75 mL DNS 混合, 于 100 °C 水浴加热 5 min 分钟冷却后, 加超纯水至 10 mL 定容, 在 540 nm 波长下测吸光度。

1.3.5 体外模拟发酵培养基的配制及其酵解过程

参考 Ayimbila 等^[17]的方法并稍作修改。每升基础培养基中含有 2 g 蛋白胨、2 g 酵母浸膏、0.1 g NaCl 、0.04 g KH_2PO_4 、0.4 g K_2HPO_4 、0.01 g $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.01 g $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、2 g NaHCO_3 、0.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 半胱氨酸盐酸盐、0.5 g 胆盐、2 mL 吐温 80、0.5 mL 刃天青 0.2%, (m/V), 多糖或多酚 5 g。灭菌后, 添加氯化血红素和维生素 K1。收集两男两女健康受试者的新鲜粪便样本, 经含有 0.1% L-半胱氨酸盐酸盐的 PBS 溶液稀释 (1:5, m/V) 后, 细胞筛过滤去除不溶性固体残渣, 等量混匀, 转移至厌氧环境中保存备用。

在厌氧环境下 (5% H_2 、5% CO_2 、90% N_2 , φ) 分别向培养基中接种粪便滤液 (终浓度 2%, φ), 37 °C 恒温培养。分别在 0、6、12、24 和 48 h 终止发酵。样品冷冻保存于 -80 °C, 用于后续发酵产物的分析测定。设置菊粉和去离子水分别为阳性和阴性对照, 且每样品均进行三次平行实验。

1.3.6 体外模拟酵解后多糖多酚理化性质测定

取上述模拟酵解样液, 4 800×g 离心 10 min, 取上清液过 0.22 μm 混合纤维素酯 (MCE) 水系滤膜, 糖含量、总酚、总黄酮含量测定方法同 1.3.2, 用 pH 计测定酵解产物 pH 值, 用气相色谱测定多糖多酚酵解产生的短链脂肪酸组成及含量^[18]。

1.3.7 多糖多酚 α -淀粉酶抑制率和 α -葡萄糖苷酶抑制率

根据 Bao 等^[19]的方法并做修改测定 α -淀粉酶抑制率和 α -葡萄糖苷酶抑制率, 具体如下:

将样品用蒸馏水稀释为 0.1、0.25、0.5、1、2、4、8 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 系列质量浓度, 并配制相同质量浓度阿卡波糖阳性对照溶液。试验设计样品反应组、阳性对照组、空白反应组和空白对照组, 每组均设置 3 个重复孔。依次加入 0.1 U/mL α -淀粉酶溶液 300 μL 、试样溶液 100 μL (多糖、多酚或阿卡波糖溶液), 混匀后加入 1% (m/V) 淀粉溶液 400 μL , 涡旋, 37 °C 反应 5 min ;

添加 DNS 试剂 200 μL ，煮沸 5 min，室温下稀释 25 倍，在 540 nm 下测量吸光度。计算公式如（1）所示。

$$I_1 = \frac{a-b}{a} \times 100\% \tag{1}$$

式中：
 I_1 —— α -淀粉酶抑制率；
 a ——空白反应组减去空白对照组在 540 nm 的吸收率；
 b ——样品反应组减去阳性对照组在 540 nm 的吸收率。

分别准确称取阳性药物阿卡波糖和样品，加水稀释至浓度范围为 0.1、0.25、0.5、1、2、4、8 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。试验设计样品反应组、阳性对照组、空白反应组以及空白对照组，且每组三个平行。依次加入磷酸盐缓冲液（0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，pH 值 6.8）、样品溶液至 37 $^{\circ}\text{C}$ 的 1 $\text{U} \cdot \text{mL}^{-1}$ α -葡萄糖苷酶液，37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 15 min 后加入 25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ PNPG 溶液，反应 25 min，最后加入 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 溶液终止反应。于 405 nm 波长下测定吸光度。计算公式见（2）。

$$I_2 = \frac{c-d}{c} \times 100\% \tag{2}$$

式中：
 I_2 —— α -葡萄糖苷酶抑制率；
 c ——空白反应组减去空白对照组在 405 nm 的吸收率；
 d ——样品反应组减去阳性对照组在 405 nm 的吸收率。

1.3.8 含多糖多酚面条的制备

混合全麦粉、食盐，加入 PLPS、LSPS、ABPP 和 MBPP 溶液，揉制成面团，醒发 20 min 后，多次滚压至约 2 mm 厚面片，切条（约 8 mm 宽），煮制 3~5 min。

1.3.9 原料配方单因素实验及其正交试验设计

以全麦粉作为面条基础配料。设置全麦粉 100 g，研究水、多糖（PLPS:LSPS=1:1）、多酚（ABPP:MBPP=1:1）、食盐添加量对面条的感官评价影响。基于前期动物实验的结果（未发表数据），设置多糖和多酚添加总量范围在 0.8~2 g 内。固定基础配方为：多糖添加量 0.6 g、多酚添加量 0.6 g、食盐添加量 1.5 g，水添加量 40 g。依次调整单一变量，研究各配方不同添加量对面条的感官评价影响：水添加量（30、40、50、60、70 g）；多糖添加量（0.2、0.4、0.6、0.8、1 g）；多酚添加量（0.2、0.4、0.6、0.8、1 g）；食盐添加量（0.5、1、1.5、2、2.5 g）。

根据单因素实验结果，选取水添加量、多糖总添加量、多酚总添加量及食盐添加量作为四因素，利用 Design-Expert 8.0 软件设计 $L_9(3^4)$ 正交表（表 1），开展面条配方的正交试验优化，以感官评分为指标确定最佳配方。

表 1 面条配方的正交试验				
Table 1 Orthogonal experiment of noodle formula				
水平	因素			
	A 水添加/g	B 多糖添加量/g	C 多酚添加量/g	D 食盐添加量/g
1	40	0.6	0.2	1
2	50	0.8	0.4	1.5
3	60	1.0	0.6	2

1.3.10 面条的感官评定

依据 SB/T10137-1993 标准要求，同时考虑添加食材的独特品质特性，制定了系统的感官评定方案。将制备完成的面条样品分发给 20 位经过专业培训的感官评定员，按照表 2 进行感官评价打分。

表 2 感官评分指标		
Table 2 Sensory score indicators		
项目	得分标准	评分
色泽 (25 分)	色泽不均匀	1~8
	色泽基本均匀	9~16
	色泽均匀	17~25
组织状态 (25 分)	结构松散，弹性不足，咬劲差	1~8
	结构紧密，弹性和咬劲一般	9~16
	结构紧密，弹性好，咬劲合适	17~25
口感 (25 分)	口感差，较硬或较软	1~8
	口感一般，软硬合适	9~16
	口感好，软硬良好	17~25
风味 (25 分)	不爽口，有明显的豆腥味	1~8
	较光滑，香气一般或不太浓郁	9~16
	光滑爽口，具有面粉特有的香气，无异味	17~25

1.3.11 面条的蒸煮损失率

准确称取 50.00 g 待测样品，放入 500 mL 沸腾蒸馏水中煮煮 3 min。待面条捞出后，收集煮面水，自然冷却后定容至 500 mL。移取 50 mL，经减压浓缩至粘稠状后，转移至 105 $^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥箱内干燥至质量恒定。两次恒重之差记为 m ，据此计算蒸煮损失率。

1.3.12 面条的断条率

参照《GB/T 3587-2018 粮油检验—小麦粉面条加工品质》评价测定断条率：采用 40 根 20 cm 的样品，置于 1 L 开水中煮煮 5 min。捞出冷却后，统计断裂根数，计算断条数量与全部面条的比例，获得面条蒸煮断条率。

1.3.13 面条的主要营养成分测定

水分采用 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》的直接干燥法；灰分通过 GB

5009.4-2016《食品中灰分的测定》的马弗炉灼烧法；膳食纤维依据 GB 5009.88-2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》的酶重量法；脂肪含量依据 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》的索氏提取法；蛋白质依据 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》的凯氏定氮法；钠离子按照 GB 5009.91-2017《食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定》的火焰光度法测定。

1.3.14 数据处理与分析

利用 Dedign-Expert 8.0 和 IBM SPSS 27.0 软件对实验的数据进行分析，采用两独立样本 *T* 检验进行两组独立样本均值差异的检验，采用单因素 ANOVA 和 Duncan's Test 进行多组间显著差异分析，用 GraphPad 8.0 软件对实验结果进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 多糖多酚基本成分组成

葛根多糖 (PLPS)、莲子多糖 (LSPS)、赤小豆多酚 (ABPP) 和绿豆多酚 (MBPP) 的得率分别为 1.63%、2.16%、2.38%、1.69%，PLPS 总糖含量达 $858.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，显著高于 LSPS 的总糖含量 $655.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ($P < 0.05$)，两者糖醛酸含量差异显著 ($P < 0.05$)，PLPS 为 $220.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，LSPS 为 $151.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。PLPS 较高的糖醛酸含量可能使其形成更复杂、更稳定的三维结构，并提供更多的活性位点，使其能够更好地与其他生物分子相互作用^[9]。ABPP 的总酚含量为 $54.23 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ ，显著高于 MBPP 的含量 $39.29 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ ($P < 0.05$)。

2.2 体外模拟消化后多糖多酚基本成分的变化

图 1 展示了 PLPS 在模拟体外消化后的中性糖、糖醛酸和总糖含量分别为 614.34 、 212.72 、 $826.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，LSPS 分别为 489.43 、 139.21 、 $628.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。结果显示，PLPS 和 LSPS 在口腔、胃部和小肠消化后，中性糖、糖醛酸和总糖含量均无显著性变化 ($P > 0.05$)。

还原糖含量是评估多糖降解及糖苷键断裂的重要指标。如图 2 所示，胃消化过程中 (0.5~6 h) 各时间点间无显著差异 ($P > 0.05$)，表明胃酸及消化酶对两种多糖的糖苷键无显著影响。类似地，模拟小肠消化 6 h 后，还原糖含量保持不变 ($P > 0.05$)。综上，葛根多糖与莲子多糖在口腔、胃及小肠消化过程中保持稳定，未发生糖苷键断裂或显著降解，提示唾液淀粉酶、胃蛋白酶、胰酶及胆汁对其结构无显著影响。闵芳芳^[4]和景永帅^[5]等报道的青钱柳多糖和玉竹多糖在体外消化后也未被消化，而 Hu 等^[20]报道车前子多糖在消化过程中分子量稳步降低，还原糖含量逐步增加，

表明不同多糖的抗消化性质不同。

如图 3 所示，在体外模拟胃部和小肠消化过程中，ABPP 与 MBPP 总酚含量均显著增加 ($P < 0.05$)，从 0 h 的 $28.07 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $20.18 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 48 h 的 $51.24 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $48.54 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ ，这主要由于肠液中胰蛋白酶和胆汁的刺激，使得多酚从复杂提取物基质中释放。二者消化表现与赵慧芳等^[21]对蓝莓多酚体外消化的研究结果相符，胃和肠消化阶段可促进多酚物质释放。此外，ABPP 总黄酮含量在胃部和小肠也呈现显著增加 ($P < 0.05$)。研究表明，不同多酚在体外模拟消化阶段变化不同，如玉兰、万寿菊黄酮增加^[22]，而柑橘果皮总黄酮含量下降^[23]。

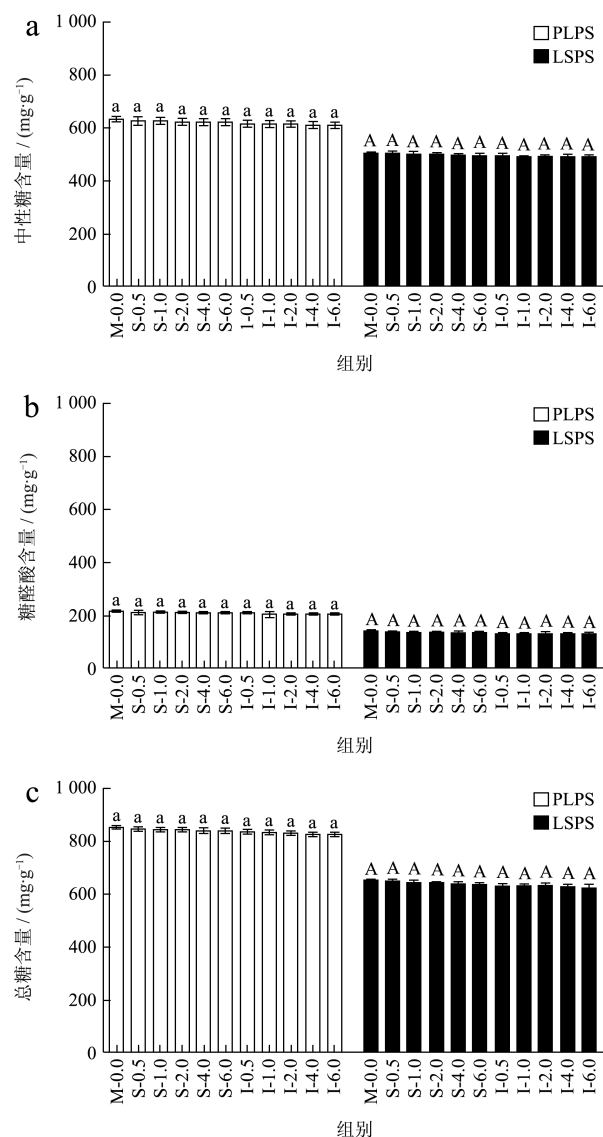


图 1 体外消化过程中多糖中性糖、糖醛酸和总糖含量变化
Fig.1 Changes in neutral sugar, uronic acid, and total sugar content during *in vitro* digestion

注：M、S、I 分别指口腔、胃部、肠部消化阶段，数字则表示消化的小时数。图中小写字母表示 PLPS 变化相似，图中相同大写字母表示 LSPS 变化相似 $P > 0.05$ 。

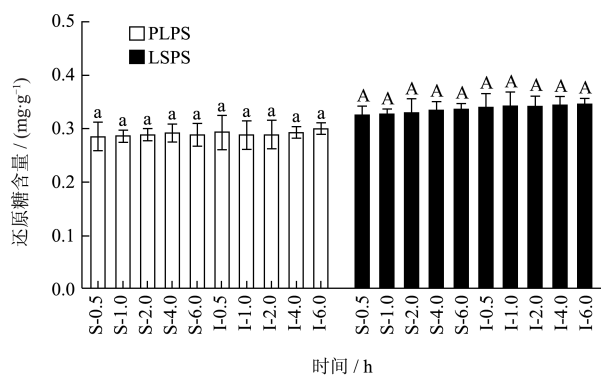


图2 体外消化后各部位各时间点还原糖含量变化图

Fig.2 Reducing sugar content of each site at each time point after *in vitro* digestion

注：图中不同小写字母表示 PLPS 变化差异显著，图中不同大写字母表示 LSPS 变化差异显著 $P < 0.05$ 。

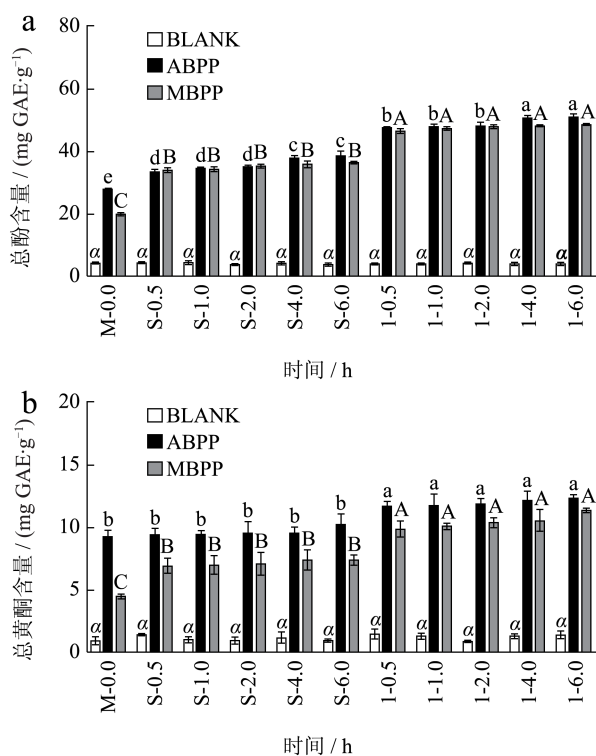


图3 体外消化后各部位各时间点多酚中总酚和总黄酮含量变化

Fig.3 Changes of polyphenol total phenol and total flavonol content in different parts and time points after *in vitro* digestion

注：图中不同小写字母表示 ABPP 变化差异显著，图中不同大写字母表示 MBPP 变化差异显著 $P < 0.05$ 。

2.3 体外模拟酵解后多糖多酚基本成分的变化

图4显示，在体外模拟酵解实验中，以菊粉为阳性组，结果显示三者中性糖均被快速消耗，消耗量分别为83.07%、61.83%、62.40%，同时，二者糖醛酸含量显著降低 ($P < 0.05$)，变化量为31.43%、34.43%。这表明两种多糖与菊粉类似，均可作为碳源参与肠道

菌群酵解，且有研究表明肠道菌群对不同结构和性质的多糖，酵解及利用能力存在显著差异^[22]。菊粉总糖含量显著最低 ($P < 0.05$)，酵解利用效率最高。这表明葛根多糖和莲子多糖均可作为碳源参与肠道菌群酵解，且肠道菌群对不同结构和性质的多糖，其酵解及利用能力存在显著差异。

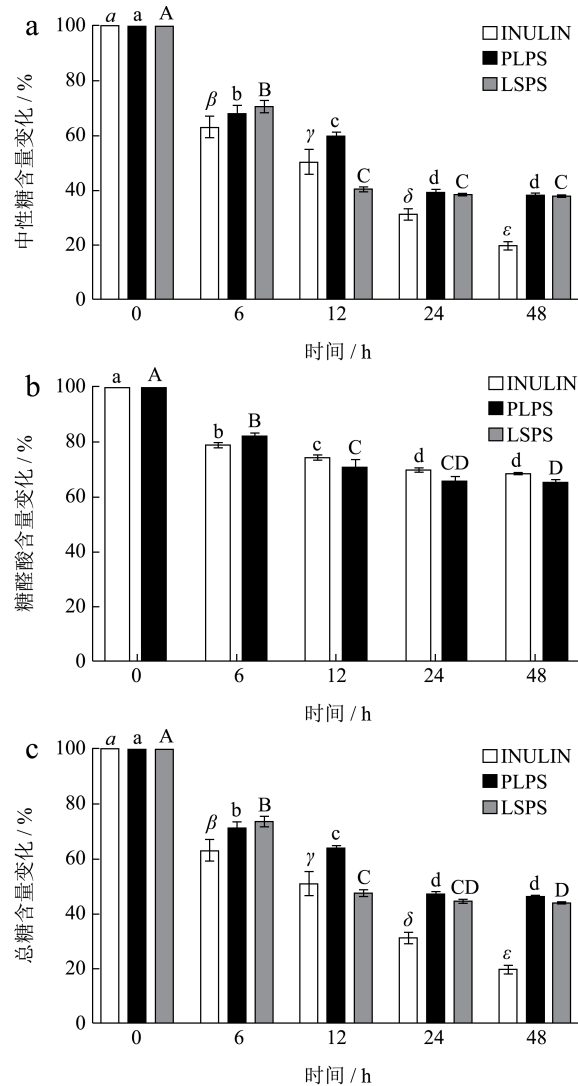


图4 体外酵解中多糖中性糖、糖醛酸和总糖含量随时间变化情况

Fig.4 Changes in the contents of neutral sugars, uronic acids, and total sugars in polysaccharides over time during *in vitro* fermentation

注：图中不同符号 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ ，表示 INULIN 变化差异显著 $P < 0.05$ ；图中不同小写字母表示 PLPS 变化差异显著，图中不同大写字母表示 LSPS 变化差异显著 $P < 0.05$ 。

多酚变化趋势与多糖相似。如图5所示，ABPP总酚含量在6、12、48 h显著下降，MBPP在0~48 h持续显著下降。0 h至48 h，ABPP总酚含量从34.58 mg GAE·g⁻¹降至22.99 mg GAE·g⁻¹，MBPP则从23.3 mg GAE·g⁻¹降至13.52 mg GAE·g⁻¹，表明二者

可被肠道菌群利用。邓逢时等^[24]研究显示,消化后藏茶多酚总酚含量显著下降,ABPP和MBPP与上述研究类似。此外,ABPP总黄酮含量在24 h显著下降到 $10.11 \text{ mg GAE} \cdot \text{g}^{-1}$ ($P < 0.05$),MBPP无显著变化 ($P > 0.05$),可能因黄酮类物质未被完全降解或降解产物保留黄酮母核结构^[25],如Selma^[26]所研究的,部分黄酮苷如槲皮素-3-O-葡萄糖苷,在肠道菌群作用下水解为苷元,但总黄酮含量不变。

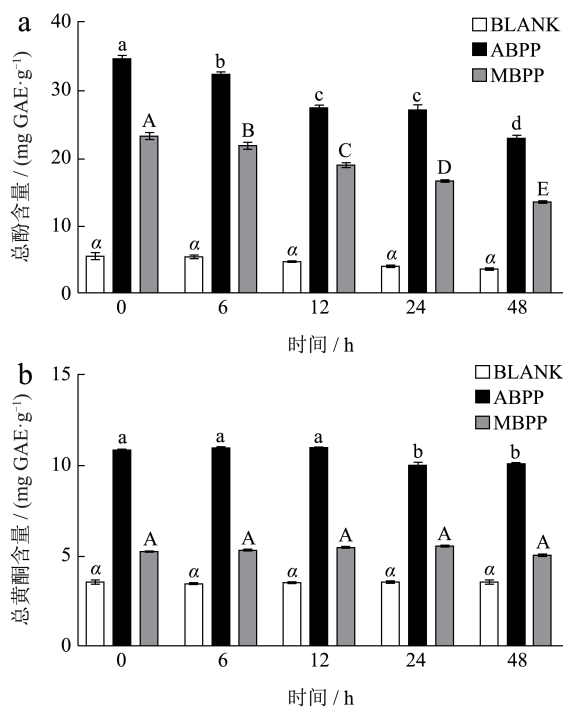


图5 体外酵解中多酚总酚和总黄酮含量随时间变化情况

Fig.5 Changes in total phenolic and total flavonoid contents over time during *in vitro* fermentation

注: 图中不同小写字母表示 ABPP 变化差异显著, 图中不同大写字母表示 MBPP 变化差异显著 $P < 0.05$ 。

如图6所示, 菊粉和四种多糖多酚样品的 pH 值均随酵解时间延长呈下降趋势, 48 h 后 pH 值降低 13.84%~25.71%, 其中菊粉组的 pH 值降幅最为显著 ($P < 0.05$), 有研究表明, 多糖因含糖醛酸及复杂分支结构, 阻碍菌群酶解效率, 导致 SCFAs 生成速率显著弱于菊粉^[22] ($P < 0.05$)。多酚组的 pH 值下降则源于肠道菌群对其酚酸组分的代谢^[26]。表明多糖多酚与菊糖类似, 可通过代谢产酸导致酵解体系 pH 值下降, 且不同样品的降 pH 值幅度存在差异。

短链脂肪酸 (SCFAs) 对维持宿主生理功能和细胞能量平衡至关重要, 其含量变化常作为评估多糖多酚发酵效果的关键指标^[27]。如图7所示, 在酵解进程中, 添加各多糖多酚均能显著提升总 SCFAs 的含量 ($P < 0.05$), 总 SCFAs 含量增加 1.5~2.4 倍。其中, LSPS 组显著最高 ($P < 0.05$) 为 $54.69 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 依次

是 MBPP 组、ABPP 组、PLPS、INULIN。酵解 48 h 后, ABPP 组的乙酸含量为 $10.56 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 除 LSPS 组和 MBPP 组外, 该值显著高于其他各组 ($P < 0.05$)。丙酸与丁酸以 LSPS 组显著最高 ($P < 0.05$), 分别为 16.65 、 $16.85 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。异丁酸和异戊酸含量分别在 PLPS 和 MBPP 组显著最高 ($P < 0.05$), 分别为 4.75 、 $6.21 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。而过往的研究表明, SCFAs 具有重要的生理功能。乙酸是结肠中最丰富的 SCFAs, 可被宿主细胞和肠道微生物用作能量来源^[28]; 丙酸可促进益生菌的生长和增殖, 维持肠道微生态平衡^[29]; 丁酸可以调节上皮细胞和免疫细胞的增殖和凋亡^[30]; 异丁酸可以调节免疫细胞的产生、流通和功能, 从而增强机体的免疫力^[31]。以上结果表明, 菊粉和四种多糖多酚对 SCFAs 的组分及含量影响存在显著差异, 不同多糖多酚可通过调控肠道菌群的代谢偏好, 选择性促进特定 SCFAs 的生成, 进而可能在能量供给、肠道健康维持及免疫调节等方面发挥差异化作用, 可以为机体提供能量、助力维持肠道健康等。

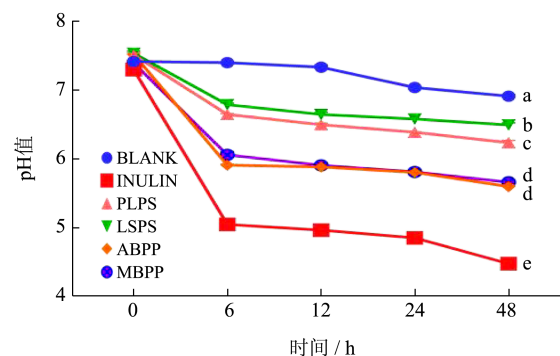


图6 体外酵解中菊粉和四种功能因子 pH 值随时间变化情况

Fig.6 pH of inulin and four functional factors over time in *in vitro* fermentation

注: 图中不同字母表示体外酵解 48 h 后 pH 值变化差异显著 $P < 0.05$ 。

2.4 多糖/多酚 α -淀粉酶抑制率和 α -葡萄糖苷酶抑制率

如图8所示, 阿卡波糖及各多糖多酚的酶抑制率在 $0.1 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 范围内均呈现质量浓度依赖性提升, 当在最高质量浓度 $8 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 阿卡波糖抑制率为 98.22% 和 99.68%, 显著高于其他四种多糖多酚 ($P < 0.05$), 其中, PLPS 的抑制率显著最高, 为 82.75% ($P < 0.05$), 而 MBPP 的抑制率显著最低, 为 18.98% ($P < 0.05$)。这表明多糖多酚能有效抑制淀粉水解为葡萄糖, 延缓其吸收与运输, 降低餐后血糖, 有助于糖尿病治疗, 且本研究中的两种多糖相较于两种多酚在体外降血糖方面效果更显著, 研究表明其可能机制为抑制淀粉水解及 α -1,4-糖苷键断裂, 延缓葡萄糖吸收^[32]。

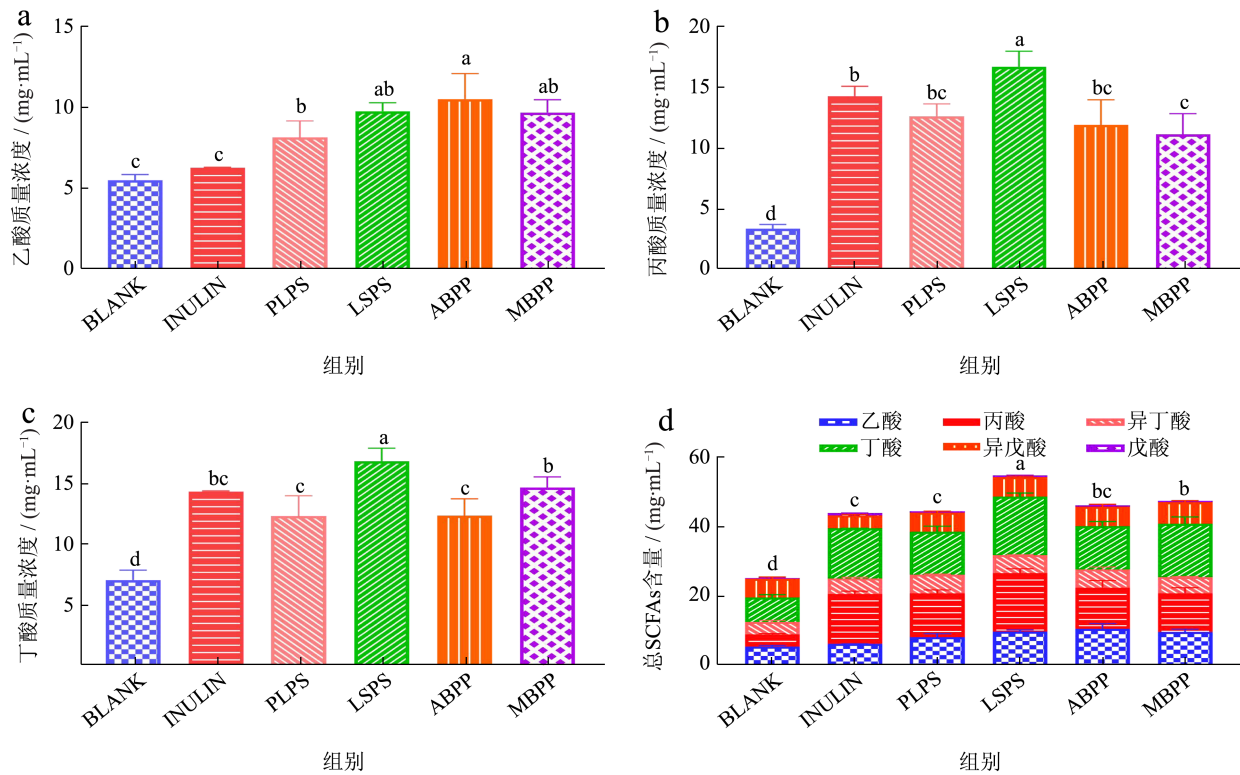


图 7 体外酵解后乙酸、丙酸、丁酸浓度和总 SCFAs 含量情况

Fig.7 The conditions of acetic acid concentration, propionic acid concentration, butyric acid concentration and total SCFAs content after *in vitro* glycolysis

注：图中不同字母表示变化差异显著 $P < 0.05$ 。

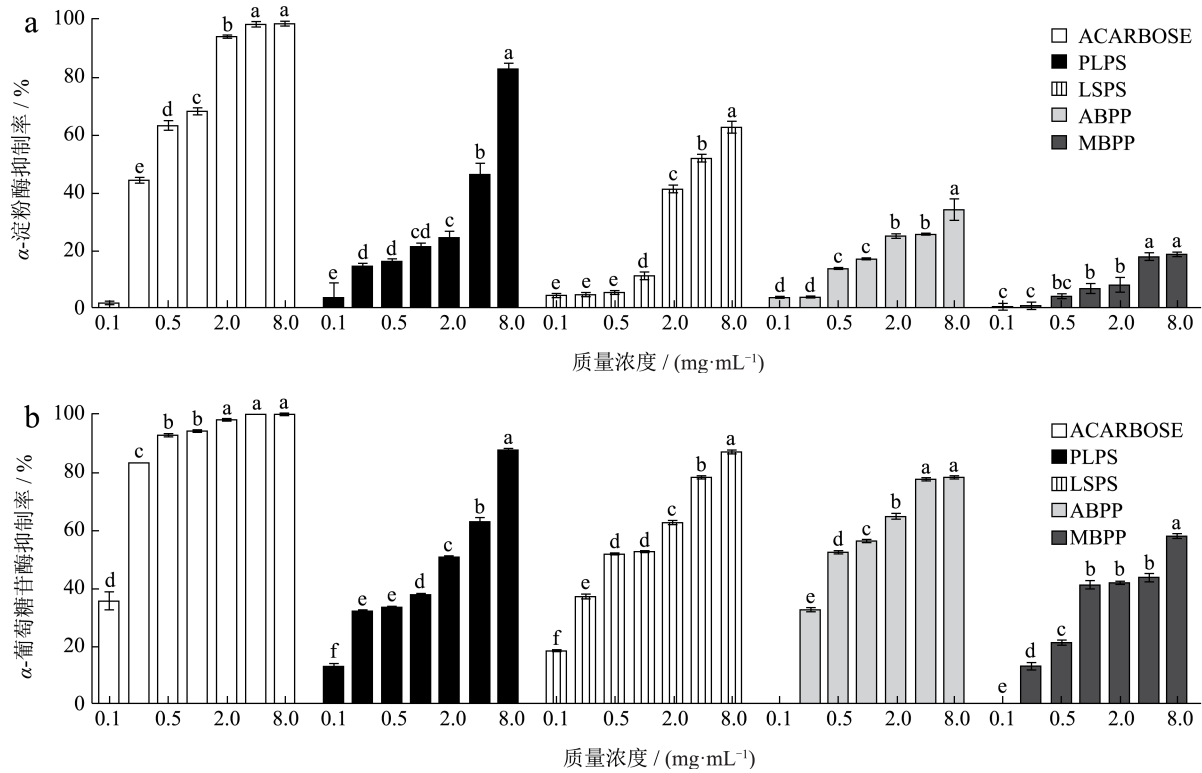


图 8 不同浓度多糖 / 多酚溶液的 α -淀粉酶抑制率和 α -葡萄糖苷酶抑制率

Fig.8 Inhibition rate of α -amylase and α -glucosidase with different concentration of polysaccharide/polyphenol solution

注：图中不同字母分别表示 5 种样品不同浓度变化差异显著 $P < 0.05$ 。

2.5 单因素分析水、多糖、多酚和食盐对面条感官品质的影响

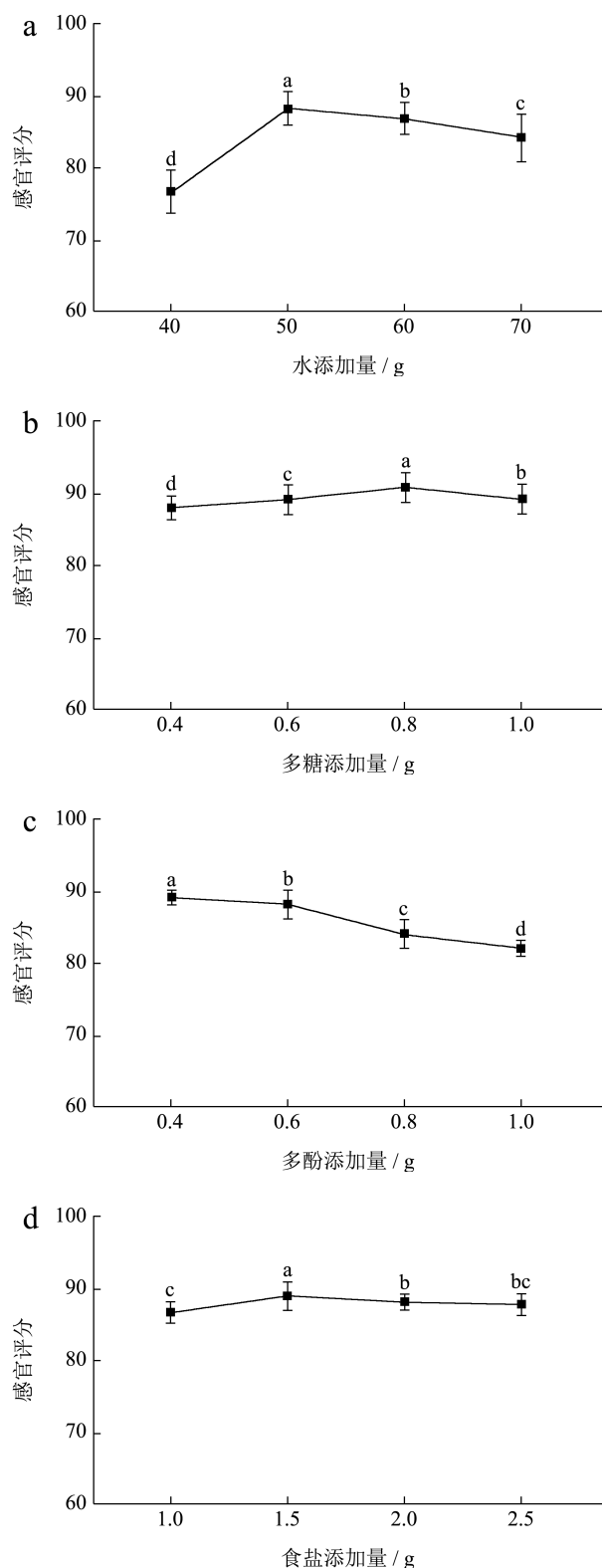


图9 单因素分析水、多糖、多酚和食盐添加量对面条的影响
Fig.9 Univariate analysis of the effects of water, polysaccharides, polyphenols and salt addition amounts on noodles

注：图中不同字母表示变化差异显著 $P < 0.05$ 。

由图9可知，随着水、多糖、食盐添加量（质量分数）的变化，面条感官品质评分呈现先增后减的趋势。水添加量50 g时，面条综合感官评分最高（88.30分），其作用包括形成面筋网络、调节口感及影响熟化；多糖添加量0.8 g时效果最佳（90.60分），随着多酚添加量的增多，面条感官品质评分呈下降趋势，当多酚添加量为0.4 g时，面条的综合感官评分最高。为进一步验证该结果，补充了0.2 g多酚添加量的实验，结果显示其感官评分低于0.4 g添加量时的评分。由此证明，多酚添加量为0.4 g时，面条的品质和效果较好。研究表明，面条中添加多糖能提高面条保水能力、表面光滑度，减少蒸煮损失，并改变面筋蛋白二级结构，促进交联^[33]；多酚添加量0.4 g时品质较好（89.30分），添加多酚可改善面条强度、结构性能、颜色效果及抗氧化和感官特性^[34]；食盐添加量1.5 g时品质优良（89.00分），能改善面条特性、调节水分、增强面筋网络、影响蒸煮品质等，适量添加可增大面条表面光亮程度，使其口感更丝滑^[35]。

2.6 正交分析水、多糖、多酚和食盐对面条感官品质的影响

基于单因素实验结果，以水添加量（A）、多糖添加量（B）、多酚添加量（C）和食盐添加量（D）四个因素为考察因素，进行 $L_9(3^4)$ 正交实验如表3所示。由极差R值分析可知，四个因素对面条的影响程度为： $A > B > D > C$ ，表明水对于形成面筋网络、调节面条口感、影响面条的熟化起到至关重要的作用，其次是多糖，用多糖代替市面上的黄原胶和果胶等稳定剂，能够提高面条的持水能力，并且改变面筋蛋白的二级结构，形成更紧密的面筋网络结构。根据K值，最优配方水平组合为： $A_2B_1C_3D_3$ ；根据感官评分，最优配方水平组合为： $A_2B_1C_2D_3$ 。

2.7 面条配方验证

由上表正交试验结果可知，面条最佳工艺条件组合为 $A_2B_1C_3D_3$ ，正交试验设计中无水平组合，而感官评分最高的 $A_2B_1C_2D_3$ ，因此采用 $A_2B_1C_3D_3$ 和 $A_2B_1C_2D_3$ 进行验证实验。结果表明， $A_2B_1C_2D_3$ 的感官评价得分为88.6，小于 $A_2B_1C_3D_3$ 的感官评分90.9，确定最佳工艺为每100 g全麦面粉，水添加量50 g，多糖添加量0.6 g，多酚添加量0.6 g，食盐2 g。

2.8 面条的蒸煮损失率、断条率以及主要营养成分结果

测得经配方优化后的面条蒸煮损失率为6.31%，断条率为9.54%，均显著低于市售高筋小麦面条

(9.7%、15.3%)，且在功能性面条加工特性研究中全麦基面条数据范围内^[36]，表明配方优化有效改善了产品质构稳定性。面条中每 100 g 干重含钙量为 0.42 g、含水分 37.27 g、含灰分为 5.32 g、含蛋白质为 9.29 g、含脂肪为 1.49 g、含膳食纤维为 9.47 g、含钠量为 0.63 g，具有高膳食纤维特征，其膳食纤维含量达传统面条的 3~6 倍，蛋白质和钙分别提升 1.5 倍和 5 倍以上^[37]，表明其可作为糖尿病膳食管理中兼具营养密度与代谢调控功能的主食替代方案。

表 3 面条配方L₉ (3⁴) 正交实验设计
Table 3 Orthogonal experimental design of noodle formula production process L₉ (3⁴)

试验号	因素				感官评分
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	76.1
2	1	2	2	2	76.5
3	1	3	3	3	76.9
4	2	1	2	3	87.9
5	2	2	3	1	82.5
6	2	3	1	2	81.8
7	3	1	3	2	86
8	3	2	1	3	84.6
9	3	3	2	1	79.9
K1	76.5	83.3	80.83	79.5	
K2	84.1	81.2	81.43	81.43	
K3	83.5	79.5	81.8	83.13	
极差	7.57	3.8	0.97	3.63	
因素主次		A>B>D>C			

3 结论

该研究分析了葛根多糖、莲子多糖、赤小豆多酚和绿豆多酚在体外消化与酵解中的变化，并优化了其面条配方。结果显示，葛根多糖总糖和糖醛酸含量高于莲子多糖，赤小豆多酚总酚和总黄酮含量及抗氧化能力强于绿豆多酚。体外消化促进多酚释放，肠道菌群则对多糖和多酚利用存在差异。四种成分均能抑制α-淀粉酶和α-葡萄糖苷酶活性，具有调控餐后血糖的潜力。优化后的面条蒸煮损失率和断条率低于市售面条，且含有“食药同源”成分葛根多糖、莲子多糖、赤小豆多酚和绿豆多酚，富含膳食纤维和蛋白质，适用于糖尿病膳食管理。

参考文献

[1] WANG H, LI H, HOU Y, et al. Plant polysaccharides: sources, structures, and antidiabetic effects [J]. Current Opinion in Food

Science, 2023, 51: 101013.
[2] ZHANG Y, LIU J, WANG Q, et al. Polyphenols from green tea inhibit α-amylase and α-glucosidase activities: structure-activity relationship [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(15): 4215-4224.
[3] TONG H, LIANG Z, WANG G. Structural characterization and hypoglycemic activity of a polysaccharide isolated from the fruit of Physalis alkekengi L [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71(2): 316-323.
[4] 闵芳芳, 聂少平, 万宇俊, 等. 青钱柳多糖在体外消化模型中的消化与吸收[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 24-29.
[5] 景永帅, 孙丽丛, 张瑞娟, 等. 玉竹多糖的体外消化特性及其与乳杆菌和大肠杆菌的相互作用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(2): 21-28.
[6] NIKOLINA L, TEA B, ANET R J, et al. Stability of blueberry polyphenols subjected to *in vitro* digestion with human gastrointestinal enzymes [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2020, 79(OCE2): E240.
[7] LIJIAO L K, EDOARDO C, VINCENZO F, et al. Tea polyphenols as a strategy to control starch digestion in bread: the effects of polyphenol type and gluten [J]. Food & Function, 2020, 11(7): 5933-5943.
[8] AHASANUL K, LEILA M, EMMANUEL F O, et al. Effect of polysaccharide-induced viscosity on the digestion of proteins, fats, and carbohydrates in food: A comprehensive review and future perspectives [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104757.
[9] 蔡春沉, 徐燕颖, 王洪玺, 等. 葛根多糖对2型糖尿病大鼠的治疗作用及机制研究[J]. 天津中医药, 2014, 31(2): 94-97.
[10] 苗明三, 徐瑜玲, 方晓艳. 莲子多糖对衰老模型小鼠抗氧化作用的研究[J]. 中国现代应用药学, 2005, 1: 11-12.
[11] 王彤, 何志谦, 梁奕铨, 等. 眉豆、绿豆及赤小豆对餐后血糖影响的研究[J]. 食品科学, 2001, 5: 74-76.
[12] 沈鑫婷, 姜秀杰, 许庆鹏, 等. 发芽绿豆多酚提取物对II型糖尿病小鼠糖脂代谢的改善作用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 132-139.
[13] 谢建华, 谢明勇, 聂少平, 等. 苯酚-硫酸法测定青钱柳中多糖含量[J]. 食品工业, 2010, 31(4): 93-95.
[14] 史建鑫. 昆布多酚提取、抗氧化与抑菌活性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
[15] 王富豪. 不同品种绿豆营养品质、多酚化合物组成及功能活性研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021.
[16] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
[17] AYIMBILA F, SIRIWONG S, NAKPHAICHIT M, et al. *In vitro* gastrointestinal digestion of *Lentinus squarrosulus* powder and impact on human fecal microbiota [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 2655.
[18] 胡婕伦. 大粒车前子多糖体内外消化与酵解特征体系构建及其促进肠道健康的作用[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
[19] BAO T, WANG Y, LI Y T, et al. Antioxidant and antidiabetic properties of tartary buckwheat rice flavonoids after *in vitro* digestion [J]. Journal of Zhejiang University-science B, 2016,

- 17(12): 941-951.
- [20] 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.
- [21] 赵慧芳,吴文龙,李维林,等.蓝莓多酚微胶囊的制备及体外消化特性研究[J].江西农业大学学报,2024,46(4):1001-1011.
- [22] HOLSCHER H D. Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota [J]. *Gut Microbes*, 2017, 8(2): 172-184.
- [23] 邓彦丽,彭梦雪,刘冬,等.柑橘在体外模拟胃肠消化过程中总多酚、总黄酮及总抗氧化活性的变化规律[J].食品科学,2016, 37(17):96-103.
- [24] 邓逢时.藏茶多酚和多糖的提取及体外模拟消化和酵解特性的研究[D].雅安:四川农业大学,2024.
- [25] WILLIAMSON G. The role of polyphenols in modern nutrition [J]. *Nutrition Bulletin*, 2017, 42(3): 226-235.
- [26] SELMA M, ESPÍN J C, TOMÁS-BARBERÁN F. Interaction between phenolics and gut microbiota: role in human health [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57: 6485-6501.
- [27] CATTIVELLI A, NISSEN L, CASCIAO F, et al. Impact of cooking methods of red-skinned onion on metabolic transformation of phenolic compounds and gut microbiota changes [J]. *Food & Function*, 2023, 14(8): 3509-3525.
- [28] BYRNE C S, CHAMBERS E S, MORRISON D J, et al. The role of short chain fatty acids in appetite regulation and energy homeostasis [J]. *International Journal of Obesity (London)*, 2015, 39(9): 1331-1338.
- [29] HAGHIKIA A, JÖRG S, DUSCHA A, et al. Dietary fatty acids directly impact central nervous system autoimmunity via the small intestine [J]. *Immunity*, 2015, 43(4): 817-829.
- [30] CANANI R B, COSTANZO M D, LEONE L, et al. Potential beneficial effects of butyrate in intestinal and extraintestinal diseases [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2011, 17(12): 1519-1528.
- [31] TROMPETTE A, GOLLWITZER E S, PATTARONI C, et al. Dietary fiber confers protection against flu by shaping Ly6c⁺ patrolling monocyte hematopoiesis and CD8⁺ T cell metabolism [J]. *Immunity*, 2018, 48(5): 992-1005.
- [32] KRENTZ A J, BAILEY C J. Oral antidiabetic agents: current role in type 2 diabetes mellitus [J]. *Drugs*, 2005, 65(3): 385-411.
- [33] LI H, HAO Y P, DAI Y, et al. Effects of protein-polysaccharide extracted from *Auricularia auricula-judae* mushroom on the quality characteristics of Chinese wheat noodles [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2023, 182: 114783.
- [34] HAN C W, MA M, ZHANG H H, et al. Progressive study of the effect of superfine green tea, soluble tea, and tea polyphenols on the physico-chemical and structural properties of wheat gluten in noodle system [J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125676.
- [35] TOYOSAKI T, SAKANE Y. Effects of salt on wheat flour dough fermentation [J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2013, 5(2): 84-89.
- [36] YAO Y Y, ZHOU C X, WANG J Y, et al. Improving of noodle quality caused by starch-protein interaction of waxy and strong-gluten wheat flour [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2023, 188: 115394.
- [37] 祝雪寒,叶琦玥,朱琰,等.马齿苋面条加工工艺优化及品质分析[J].农产品加工,2024,6:38-41.