厉芝, 张婷, 孙杰, 等. 酶-酸协同法提取小麦麸皮可溶性膳食纤维及其高纤饮料的创制 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 246−258. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050246
LI Zhi, ZHANG Ting, SUN Jie, et al. Extraction of Soluble Dietary Fiber from Wheat Bran Using Enzyme-Acid Synergistic Method and Development of a High-fiber Beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 246−258. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050246

·工艺技术·

酶-酸协同法提取小麦麸皮可溶性膳食纤维及其高纤饮料的创制

厉　芝[1],张　婷[1],孙　杰[1],王晓玲[2],李　秋[2],李　菲[1,*]
(1.青岛大学生命科学学院,山东青岛 266071;
2.山东鲁花集团,山东莱阳 265200)

摘　要:为推动麦麸资源的高值化利用，本研究以小麦麸皮为原料，采用酶-酸协同法提取可溶性膳食纤维（soluble dietary fiber，SDF）。通过单因素实验与正交试验优化提取工艺，系统评价其持水性、持油性、膨胀性及对胆酸盐、亚硝酸盐和葡萄糖的结合功能，基于体外模拟消化模型分析其抗消化特性的调控作用及探究其对淀粉消化行为的影响。在此基础上，以 SDF 为核心功能性配料，通过单因素与正交试验优化高纤饮料配方，并开展验证试验及 14 d 贮藏稳定性评价。结果表明，最佳提取工艺为酸处理 pH2.0、温度 100 ℃、时间 2 h，该条件下 SDF 提取率达 18.40%±0.78%；所得 SDF 持水性、持油性和膨胀度分别为 7.35 g/g、5.40 g/g 和 5.89 mL/g，对甘氨胆酸钠、牛磺胆酸钠的结合率分别为 15.85% 和 18.14%，亚硝酸盐结合能力达 43.80 μg/g，葡萄糖结合能力为 0.9 mmol/g；且 SDF 可延缓葡萄糖扩散速率达 88%。此外，SDF 可以抑制淀粉糊化，使抗性淀粉（resistant starch，RS）比例提升 20%，且其在模拟胃肠环境中化学结构稳定性良好。饮料优化结果显示最佳配方为茶原液与纯净水体积比=1∶1.5、木糖醇 8%（m/V）、柠檬酸 0.06%（m/V）、SDF 0.25%（m/V），验证试验中该配方感官评分为 93±0.21 分，贮藏 14 d 后沉淀率低于 5%，pH 保持稳定（3.52~3.91），表明产品兼具优良口感与贮藏稳定性。本研究结果不仅为麦麸 SDF 的工业化生产提供了成熟的工艺参数和技术支撑，还揭示了小麦麸皮 SDF 在调节糖脂代谢、改善淀粉消化特性等方面的功能特性，表明其可成为开发调节血糖及糖脂代谢相关的功能性食品的原料。

关键词:小麦麸皮,可溶性膳食纤维,功能特性,提取方法,高纤饮料
中图分类号:TS209　　**文献标识码:** B　　**文章编号:**1002−0306(2026)12−0246−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050246
本文网刊:

Extraction of Soluble Dietary Fiber from Wheat Bran Using Enzyme-Acid Synergistic Method and Development of a High-fiber Beverage

LI Zhi[1], ZHANG Ting[1], SUN Jie[1], WANG Xiaoling[2], LI Qiu[2], LI Fei[1,*]
(1.College of Life Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China;
2.Shandong Luhua Group Co., Ltd., Laiyang 265200, China)

Abstract: To promote the high-value utilization of wheat bran, soluble dietary fiber (SDF) was extracted using an enzyme-acid synergistic method. A combination of single-factor and orthogonal experimental designs was used to optimize the extraction process. Subsequently, the functional properties of the SDF, were systematically evaluated, including its water-holding, oil-holding and swelling capacities, as well as its binding capacities for cholate, nitrite, and glucose. Moreover, this study employed an *in vitro* simulated digestion model to analyze its regulatory effect on digestive resistance and its impact on starch digestion behavior. Guided by these findings, the SDF served as the core functional ingredient for a high-fiber beverage, with formulation optimization via single-factor and orthogonal testing, validation, and a 14-day storage stability

收稿日期: 2025−05−26
基金项目: 山东省自然科学基金（ZR202211230270）。
作者简介: 厉芝（1998−）,女,硕士研究生,研究方向:活性多糖高效制备与活性探究,E-mail:zhili1198@163.com。
*** 通信作者:** 李菲（1995−）,女,博士,讲师,研究方向:食品功能因子的提取纯化、结构解析与其活性挖掘,E-mail:pdlifei@163.com。

assessment. The results showed the optimal extraction parameters of SDF to be pH2.0, 100 ℃, and 2 h, yielding 18.40%± 0.78%. The obtained SDF exhibited water-holding, oil-holding, and swelling capacities of 7.35 g/g, 5.40 g/g, and 5.89 mL/g, respectively; The binding rates for sodium glycocholate and sodium taurocholate were determined to be 15.85% and 18.14%, respectively; The nitrite and glucose binding capacities reached 43.80 μg/g and 0.9 mmol/g, respectively. Moreover, the SDF effectively delayed glucose diffusion by 88%, inhibited starch gelatinization, increased resistant starch (RS) content by 20%, and maintained its structural stability under simulated gastrointestinal conditions. The beverage optimization results indicated that the optimal formulation comprised a 1∶1.5 (v/v) tea liquid to water ratio, supplemented with 8% (m/v) xylitol, 0.06% (m/v) citric acid, and 0.25% (m/v) SDF. In validation test, this formulation achieved a sensory evaluation score of 93±0.21 points. After 14 days of storage, the sedimentation rate remained below 5%, and the pH stayed stable, ranging from 3.52 to 3.91, indicating that the beverage exhibited excellent sensory property and storage stability. This study not only provided validated process parameters and technical support for the industrial production of wheat bran SDF, but also elucidated its functional properties in regulating glucose and lipid metabolism as well as modifying starch digestion characteristics. These findings demonstrate that the potential of wheat bran SDF as a functional food ingredient for regulating blood glucose and modulating glucose-lipid metabolism.

Key words: wheat bran; soluble dietary fiber; functional properties; extraction method; high-fiber beverages

小麦作为全球种植范围最广的谷物之一，年产量逾 6.5 亿吨，在世界粮食供给中占据重要地位。麦麸是小麦制粉过程中重要的副产物，富含膳食纤维（含量超过 40%）、淀粉、蛋白质及黄酮类化合物等营养成分[1]。目前麸皮在酿酒、酿醋、饲料等传统领域的应用研究较为广泛，导致其普遍存在产品附加值不高、资源利用率较低等问题[2]。当前工业化提取可溶性膳食纤维（SDF）的主要瓶颈包括：一是提取方法的局限性，如酶解法成本较高，微生物法对环境条件要求复杂难以实现工业化生产，传统化学法（如碱法）存在操作困难、不环保等问题；二是提取效率与得率问题，部分方法得率较低，难以满足工业化生产的效益需求，如周丽媛等[3] 通过挤压膨化方式提取黑小麦麸皮中的 SDF，得率较低为 16.17%。郭苗苗等[4] 采用碱提法提取麦麸中的 SDF，得率仅为 11.45%；三是工艺稳定性与规模化难题，实验室优化的工艺参数在规模化生产中可能难以保持稳定，且设备投入、生产流程控制等方面存在挑战[5]。因此，开发麦麸膳食纤维的高效制备技术，对提升麦麸资源利用效率具有重要意义。

膳食纤维在营养学中被定义为食品中无法被人体胃肠道消化酶系统分解的非消化性成分集合。依据其在水环境中的溶解特性，膳食纤维可分为：可溶性膳食纤维（soluble dietary fiber, SDF）与不溶性膳食纤维（insoluble dietary fiber, IDF）两大类别[6]。作为膳食纤维的重要功能组分，SDF 具备独特的水溶性和发酵特性，其主要成分包括纤维素，半纤维素，果胶等天然多糖[7]。目前 SDF 的提取方法有很多，包括化学法、酶法、物理法等，联合使用多种方法会使得 SDF 的提取率增高，理化性质更加优良，如李蕴等[8] 通过单一酶法提取黑豆中的可溶性膳食纤维，提取率为 38.4%，李晓宁等[9] 通过单一酸法提取大豆皮中可溶性膳食纤维，提取率为 12.49%，而陈创业等[10] 通过酶-化学法提取玫瑰花渣中的可溶性膳食纤维，提取率为 43.59%。近年来，SDF 的功能特性研究也取得了重要进展。谢瑶等[11] 通过动物实验，证实了魔芋低聚木糖（一种可溶性膳食纤维）能有效缓解小鼠的便秘症状，该物质使小鼠 6 h 内排便数量较模型组提升近 50%，其作用机制与促进肠道蠕动有关。赵文婧等[12] 通过体外试验研究谷子 SDF 对 7 种肠道菌群生长的影响，结果表明谷子 SDF 具有良好的持油力（4.05 g/g）、溶解度（1.78 g/100 mL）和吸附胆固醇及亚硝酸根离子的能力，且能显著促进益生菌生长、抑制有害菌生长。何姗姗等[13] 通过复合酶解法提取 14 种食用菌的 SDF，研究发现鹿茸菇 SDF 含量最高（14.73%）且抗氧化以及降糖降脂活性最强，其中 DPPH 自由基清除率为 80.38%，ABTS 阳离子自由基清除率为 68.73%；降糖方面，葡萄糖吸附能力为1.631 mmol/g，α-葡萄糖苷酶抑制率达 10.71%；降脂活性表现为胆固醇酯酶抑制率 51.46%、胰脂肪酶抑制率 36.45%，综上结果表明鹿茸菇 SDF 是优质功能性食品原料。闭琰炎等[14] 通过酶法提取和分离纯化玉竹 SDF 并进行相应体外试验，结果显示，玉竹 SDF 对 α-葡萄糖苷酶的最高抑制率达 93.23%± 0.57%，对 ABTS+自由基、羟基自由基和 DPPH 自由基的最高清除率分别为 72.60%±1.52%、51.92%± 1.17% 和 28.65%±0.77%，结果表明其具有显著的降血糖和抗氧化活性。尽管 SDF 研究取得显著进展，但原料成本和功能效价的平衡仍是产业化面临的关键问题。小麦麸皮作为大宗农产品加工副产物，其膳食纤维含量高达 40%[15]，其中 SDF 含量较高，且来源稳定、成本低廉，是开发功能性食品的理想原料。因此，研究小麦麸皮 SDF 的高效提取和功能强化技术具有重要的应用价值[16]。

基于此，本研究以小麦麸皮为原料，通过单因素实验及正交试验优化 SDF 的酶-酸协同法提取工艺，系统分析其基本化学成分及持水性、胆酸结合能力、葡萄糖吸附特性等吸附功能指标，构建体外模拟消化模型，通过测定消化液中 SDF 的分子量分布变化以及还原糖含量变化，定量评估其在不同消化阶段的抗

消化特性，并探究 SDF 对淀粉糊化和消化特性的影响。基于 SDF 的功能特性，将其作为核心配料，开发高纤饮料并优化配方。本研究为小麦麸皮 SDF 的工业化提取及功能性食品应用提供技术依据，可推动麦麸资源从饲料、酿造等传统低值化利用向高附加值功能性配料的方向升级。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦麸皮　山东鲁花集团有限公司；木瓜蛋白酶（200000 U/g）、胃蛋白酶（3000 U/mg）、胰蛋白酶（2500 U/g）、纤维素酶（10000 U/g）　南宁庞博生物工程有限公司；α-淀粉酶（10000 U/g）　上海士锋生物科技有限公司；无水乙醇、硫酸、苯酚、3,5-二硝基水杨酸等试剂　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；人工唾液、甘氨胆酸钠（HPLC≥98%）、牛磺胆酸钠（HPLC≥98%）、酒石酸钾钠（分析纯，99%）　上海源叶生物科技有限公司；金丝红茶　凤庆勋业农产品发展有限责任公司；木糖醇（食品级，99%）　亿盛源生物科技有限公司；无水柠檬酸（食品级，99%）　天津渤化永利化工股份有限公司；100T/96S 直链淀粉测定试剂盒　北京索莱宝生物科技有限公司；ml065035 TBA ELISA 试剂盒　上海酶联生物技术有限公司。

CP413 电子天平　上海奥豪斯仪器有限公司；HH-4 数显恒温水浴锅　常州易晨仪器制造有限公司；722N 可见分光光度计　上海佑科仪器仪表有限公司；PHS-3C pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司；800Y 多功能粉碎机　永康市铂欧五金制品有限公司；RE-201D 旋转蒸发器　青岛蓝特恩科教仪器设备有限公司；H2-16KR 台式高速冷冻离心机　湖南可成仪器设备有限公司；Synergy 2 酶标仪　美国伯腾仪器有限公司；LC-20AT HPLC 系统　日本岛津公司；KDT-08B 凯氏定氮仪　深圳市三莉科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SDF 提取工艺　称 5.0 g 小麦麸皮粉，按 1∶10 料液比加蒸馏水，60 ℃、pH6 下加 α-淀粉酶（0.025 g/250 U）酶解 60 min，100 ℃ 灭酶 10 min；加木瓜蛋白酶（0.006 g/1200 U）酶解 40 min，同温灭酶 10 min；盐酸调 pH 后处理；再于 60 ℃、pH6 加纤维素酶（0.075 g/750 U）酶解 4 h，100 ℃ 灭酶 10 min；冷却后在 4000 r/min 条件下离心 15 min，滤液醇沉 2 h，再离心，沉淀物冷冻干燥得 SDF。

1.2.2 小麦麸皮 SDF 提取工艺优化单因素实验

1.2.2.1 最佳酸处理 pH 确定　固定酸处理温度 80 ℃、时间 1.5 h，考察 pH（1.0、2.0、3.0、4.0、5.0）对小麦麸皮 SDF 提取率的影响。

1.2.2.2 最佳酸处理温度确定　固定酸处理 pH2.0、时间 1.5 h，考察温度（60、70、80、90、100 ℃）对小麦麸皮 SDF 提取率的影响。

1.2.2.3 最佳酸处理时间确定　固定酸处理 pH2.0、温度 80 ℃，考察酸处理时间（0.5、1、1.5、2、2.5 h）对小麦麸皮 SDF 提取率的影响。

1.2.2.4 正交试验优化　基于单因素实验结果，选取对 SDF 提取效果影响显著的酸处理 pH、温度、时间 3 个关键因素设计三因素三水平的正交试验，以 SDF 提取率为评价指标，以确定最佳工艺参数。正交试验因素水平如表 1 所示。

表 1　正交试验水平设计

Table 1　Orthogonal test factor levels

水平	pH	温度（℃）	时间（h）
1	1	80	1
2	2	90	1.5
3	3	100	2

1.2.3 SDF 基本化学成分测定

1.2.3.1 SDF 水分含量测定　参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》对 SDF 的水分含量进行测定。

1.2.3.2 SDF 蛋白质含量测定　参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》对 SDF 的蛋白含量进行测定。

1.2.3.3 SDF 纯度测定　准确称取 5.0 mg D-无水葡萄糖标准品，溶解后定容至 50 mL 配成 0.1 mg/mL 标准储备液。分别于 6 支试管中加入 0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL 葡萄糖标准溶液，并相应加入 1.00、0.80、0.60、0.40、0.20、0.00 mL 蒸馏水，再分别向每支试管中加入 1.00 mL 5% 苯酚溶液和 5.00 mL 浓硫酸，室温反应 20 min。以蒸馏水为参比，于 490 nm 波长下测定吸光度，取三次测量平均值。以葡萄糖浓度（mg/mL）为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线，得回归方程为 y=9.6852x+0.0516，决定系数 R^2=0.9999，表明标准曲线线性关系良好。样品测定时取 1.0 mL 待测液按相同步骤操作，测定其吸光度。

1.2.4 SDF 的功能性测定

1.2.4.1 持水性　参照 ZHANG 等[17] 的方法并进行修改，分别称取 1.0 g SDF，倒入离心管中，之后各加入 20 mL 蒸馏水，放置 2 h。按相同操作再制备两组平行样品。3500 r/min 离心 15 min，收集沉淀并精确称量其质量，按照下列公式计算持水力。

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{\text{样品湿质量} - \text{样品干质量}}{\text{样品干质量}} \quad \text{式（1）}$$

1.2.4.2 持油性　参照 LI 等[18] 的方法，并在此基础上修改，称取 1.0 g SDF，倒入离心管中，然后加入 20 mL 大豆油，振荡摇匀，放置 2 h。按相同操作再制备两组平行样品。3500 r/min 离心 15 min，收集沉淀并精确称量其质量，按照下列公式计算持油力。

$$持油力(g/g)=\frac{样品湿质量-样品干质量}{样品干质量}$$　式（2）

1.2.4.3　膨胀度　参照 KHAN 等[19]的方法，并在此基础上进行修改，分别称 1.0 g SDF，放入两支 25 mL 量筒中，然后各倒入 15 mL 蒸馏水。在室温下，放置 24 h，记录样品体积。进行同样的上述步骤，再制备两组平行样品，按照下列公式计算膨胀力。

$$膨胀度(mL/g)=\frac{膨胀后体积-干品体积}{样品干质量}$$　式（3）

1.2.4.4　胆酸结合能力测定　标准曲线测定：取 2 mL 不同浓度甘氨胆酸钠（0.03、0.06、0.12、0.18、0.24、0.30 mmol/L）和牛磺胆酸钠（0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 mmol/L）标准液于试管中，加 6 mL 60% H_2SO_4 混匀，70 ℃ 水浴加热 20 min，冷却后以空白溶液为参比，在 387 nm 测吸光度。以浓度（mmol/L）为横坐标、吸光度为纵坐标，分别绘制两种胆酸盐的标准曲线[20]。胆酸结合能力测定：参照尚学钰等[21]的方法进行改进，将 2 mL 样品液（10 mg/mL）与 3 mL 胃蛋白酶液（10 mg/mL）、1 mL 0.01 mol/L HCl 混合，37 ℃ 振荡 1 h；调 pH 至 6.3 后加 4 mL 胰蛋白酶液（10 mg/mL），37 ℃ 再振荡 1 h；加入 4 mL 混合胆酸盐液（含 0.3 mmol/L 甘氨胆酸钠和牛磺胆酸钠），37 ℃ 振荡反应 1 h。4000 r/min 离心 20 min，取 2 mL 上清液测吸光度，平行测定 3 次。各胆酸盐结合率 R 表示为：

$$R(\%)=\frac{M1-M2}{M1}\times 100$$　式（4）

式中，M1 为牛磺胆酸钠或甘氨胆酸钠初始加入量（mmol/L）；M2 为反应后牛磺胆酸钠或甘氨胆酸钠的剩余量（mmol/L）。

1.2.4.5　亚硝酸盐结合能力测定　参照 LUO 等[22]和 GAN 等[23]的方法，并进行相应的修改，测量 SDF 的亚硝酸盐结合能力（NIAC）。将 0.1 g SDF 样品加入 5.0 mL 20 μg/mL $NaNO_2$ 溶液，调 pH 至 7.0（模拟小肠）和 2.0（模拟胃），室温静置 2 h，4800 r/min 离心 10 min，取 0.4 mL 上清液，用对氨基苯磺酸-盐酸萘二胺法测 $NaNO_2$ 含量，计算样品结合量及 NIAC。NIAC 按下式计算：

$$NIAC(\mu g/g)=(C_i-C_s)\times V/W_s$$　式（5）

式中：C_i 和 C_s 为吸附前后上清液中 $NaNO_2$ 的浓度（μg/L），W_s 为样品质量（g），V 为 $NaNO_2$ 溶液体积（L）。

1.2.4.6　葡萄糖结合能力测定　葡萄糖结合能力（GAC）测定，参照 Ma 等[24]的方法，并进行相应的修改。取 1.0 g SDF 样品，分别加入 100 mL 不同浓度（5、50、100、200 mmol/L）葡萄糖溶液，混匀后 37 ℃ 静置 6 h。4800 r/min 离心 10 min 后取 0.5 mL 上清液，用 DNS（二硝基水杨酸盐）法检测葡萄糖浓度。GAC 按下式计算：

$$GAC(mmol/g)=(C_i-C_s)\times V/W_s$$　式（6）

式中 C_i、C_S 分别表示吸附前、后上清液中的葡萄糖浓度（mmoL/L），W_S 为 SDF 样品质量（g），V 为参与反应的葡萄糖溶液体积（L）。

1.2.5　葡萄糖扩散抑制指数　配制 100 mmol/L 的葡萄糖溶液，添加 SDF 样品，使其浓度为 1%（w/v）。将 25 mL 混合液置于 3500 Da 透析袋中，置于 200 mL 超纯水中透析。透析时，分别在 30、60、90、120、150 min 时吸取样品溶液 0.5 mL 于试管中，按 DNS 标准曲线方法测吸光值。SDF 对葡萄糖透析延迟系数按下式计算：

$$葡萄糖透析延迟系数=(1-n_1/n_0)\times 100$$　式（7）

式中：n_0 为对照组葡萄糖物质的量；n_1 为样品组葡萄糖物质的量。

1.2.6　抗体外消化能力测定

1.2.6.1　模拟消化液的制备　模拟唾液（SSF，购买所得）。模拟胃液（simulated gastric fluid，SGF）：参照岑勤[25]的方法并作修改，模拟胃液由 NaCl（3.1 g/L）、KCl（1.1 g/L）、$NaHCO_3$（0.6 g/L）和 $CaCl_2$（0.15 g/L）组成，用盐酸溶液（0.1 mol/L）调节 pH 至 2.5。然后，将 150 g 的溶液与 1 mL CH_3COONa（1.0 mol/L，pH5）和 35.0 mg 胃蛋白酶混合。将混合物 pH 调节到 2.0，即模拟胃液消化液（SGF）。模拟肠液（Simulated Intestinal Fluid，SIF）：参照岑勤[25]的方法并作修改，模拟小肠消化液由 NaCl（5.4 g/L）、KCl（0.65 g/L）和 $CaCl_2·H_2O$（0.33 g/L）组成，用 NaOH 溶液（0.1 mol/L）调节 pH 至 7。然后，将 13 mg 胰蛋白酶、100 g 胰酶溶液（7%，w/w）和 200 g 胆盐（4%，w/w）与 100 g 小肠盐溶液混合。将混合物调节 pH 至 7.5，即模拟小肠消化液（SIF），模拟消化液组成成分见表 2。

表 2　模拟消化液组成成分

Table 2　Composition of simulated digestive fluid

模拟胃液（SGF）	模拟肠液（SIF）
NaCl（3.1 g/L）	NaCl（5.4 g/L）
KCl（1.1 g/L）	KCl（0.65 g/L）
$NaHCO_3$（0.6 g/L）	$CaCl_2·H_2O$（0.33 g/L）
$CaCl_2$（0.15 g/L）	NaOH溶液（0.1 mol/L）
盐酸溶液（0.1 mol/L）	胰蛋白酶（13 mg）
CH_3COONa（1.0 mol/L，pH5）	胰酶溶液（7%，w/w，100 g）
胃蛋白酶（35.0 mg）	胆盐（4%，w/w，200 g）

1.2.6.2　体外模拟口腔消化过程　取 0.50 g SDF 与 2.0 mL 去离子水混溶，共三组平行，分别加入 4.0 mL SSF 电解质液、0.375 g α-淀粉酶（2000 U/g）、25 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$ 及 975 μL 去离子水，调 pH 至 7.0 后于 37 ℃、135 r/min 振荡 2 min。设定口消化组分别在 0 和 2 min 取样，立即沸水浴灭活酶 5 min。

1.2.6.3　体外模拟胃消化过程　向完成口相消化的 7 mL 消化液中加入 9.1 mL SGF，35 mg 胃蛋白

酶, 5 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$ 溶液和 695 μL 水, 将混合物 pH 用 1 mol/L HCl 调节至 3。然后在 37 ℃ 和 135 r/min 下水浴振荡 2 h, 在第 0、60、120 min 取样, 沸水浴 5 min 以使酶灭活。

1.2.6.4 体外模拟肠消化过程 用 1 mol/L 的氢氧化钠将胃部消化的消化液(16.8 mL)pH 调节为 7, 随后加入 1.6 g 胰酶, 16 mL 的 SGF, 40 μL 0.3 mol/L $CaCl_2$ 溶液, 4 mL 16 mmol 胆盐溶液, 最后加入 1.31 mL 超纯水。将混合物于 37 ℃ 和 135 r/min 下水浴振荡 2 h。在第 0、30、60、120 min 取样, 沸水浴 5 min 以使酶灭活(图 1)。

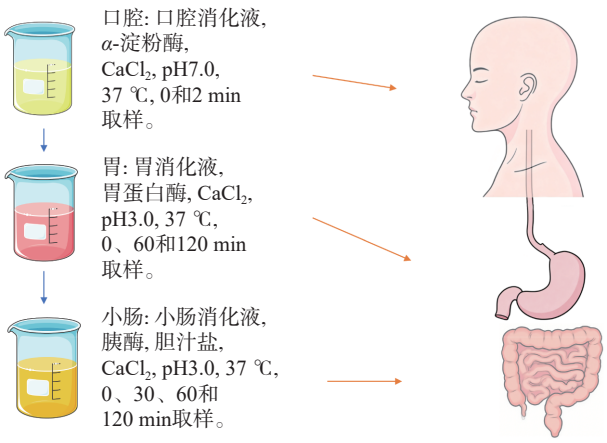


图 1 体外模拟消化各阶段示意图

Fig.1 Schematic diagram of each stage of *in vitro* simulated digestion

1.2.6.5 模拟消化后麸皮 SDF 的分子量分布测定 根据刁春仁[26] 的方法进行修改, 采用高效凝胶渗透色谱法(HPGPC)来测定样品在消化前后的分子量分布。消化前后样品均溶于流动相, 溶解后过 0.45 μm 滤膜; 消化后样品需经离心、透析(3500 Da)去除杂质。色谱条件: TSKgel GMPWXL(7.8 mm×30 cm; 8 μm)色谱柱, HPGPC 系统配有示差检测器, 柱温为 35 ℃, 每次注入 20 μL 样品溶液, 以乙酸-乙酸钠缓冲液为流动相, 流速为 0.8 mL/min, 用葡聚糖系列标准品进行线性回归校正。

1.2.6.6 模拟消化后麸皮 SDF 的还原糖含量测定 还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定样品消化前后数值。按照标准曲线的制备方法及测定条件, 测定样品的吸光度值, 并计算还原糖含量。

1.2.7 SDF 对糊化小麦淀粉体外消化的影响 参考文献 [27−29] 方法并作修改, 将 250 U 淀粉葡糖苷酶(10 万 U/g)与 13000 U 猪胰腺 α-淀粉酶(2000 U/g)溶于 25 mL pH5.2 醋酸缓冲液制混合酶液; 取 1.0 g 小麦淀粉及含等量淀粉的小麦淀粉/SDF 混合物(1.5%、3%、5%、7%、9%), 分别加 100 mL 同缓冲液, 加 3 颗玻璃珠, 沸水浴糊化 20 min, 冷却至 37 ℃ 后加 25 mL 混合酶液, 于 37 ℃、135 r/min 振荡水浴消化, 分别在 0、20、120 min 取 0.5 mL 消化液, 沸水浴 5 min 灭酶, 用 DNS 法测葡萄糖含量。

$$RDS(\%)=\frac{(G_{20}-GF)\times 0.9}{TS}\times 100 \quad 式(8)$$

$$SDS(\%)=\frac{(G_{120}-G_{20})\times 0.9}{TS}\times 100 \quad 式(9)$$

$$RS(\%)=\frac{[TS-(RDS+SDS)]}{TS}\times 100 \quad 式(10)$$

式中, G_{20} 和 G_{120} 分别为水解 20 min 和 120 min 产生的葡萄糖含量, GF 为淀粉中游离葡萄糖的含量, TS 为淀粉总干重。

1.2.8 糊化过程中直链淀粉浸出量 本试验测试对象为纯小麦淀粉以及小麦淀粉与 SDF 的混合粉。提前配制 1%、2%、3%、4%、5%(w/w)的 SDF/小麦淀粉的混合粉。取 1.0 g 小麦淀粉和含有等量淀粉的小麦淀粉/SDF 混合物加入到 20.0 g 水中, 各加入玻璃珠, 沸水浴 20 min 以完全糊化。冷却至室温, 4000×g 离心 20 min, 取 4 μL 上清液用直链淀粉测定试剂盒测定直链淀粉含量。

1.2.9 高纤饮料研发

1.2.9.1 单因素实验 以茶浓缩液(30 mL)+纯净水为基础溶液, 固定基础配方, 分别探究以下因素对饮料品质的影响: 水添加量(0、15、30、45、60 mL)、木糖醇含量(2%、4%、6%、8%、10%)、柠檬酸添加量(0%、0.03%、0.06%、0.09%、0.12%)、SDF 添加量(0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%)。

1.2.9.2 正交试验 为优化产品口感特性, 本研究选取木糖醇添加量、无水柠檬酸含量、SDF 比例及水分含量四个关键因素作为考察变量, 设计四因素三水平正交试验, 以感官评价得分为核心质量指标, 以确定产品的最优配方。正交试验因素水平如表 3 所示。

表 3 正交试验水平设计

Table 3 Orthogonal test factor levels

水平	溶液体积(mL)	木糖醇(%)	柠檬酸(%)	SDF(%)
1	30+15	4	0.03	0.25
2	30+30	6	0.045	0.5
3	30+45	8	0.06	0.75

1.2.9.3 感官评定评分标准 感官评定评分标准如表 4 所示。

表 4 高纤饮料感官评分标准

Table 4 Sensory scoring criteria for high-fiber beverages

感官评价项目	评分标准		
状态(30分)	黏度适宜, 无明显沉淀和分层(22~30分)	黏度适宜, 有少量沉淀和分层(14~21分)	黏度过大, 有明显沉淀和分层(≤13分)
外观(20分)	澄清透明, 有光泽无浑浊(15~20分)	略澄清透明, 略有光泽无浑浊(10~14分)	不澄清透明, 无光泽、浑浊(≤9分)
气味(20分)	怡人(15~20分)	有香气, 欠协调(10~14分)	无香气, 不协调(≤9分)
口感(30分)	酸甜适中, 无苦味口感柔和(22~30分)	酸甜比例不协调, 略苦味口感良好(14~21分)	酸甜比例不协调, 苦味重口感涩(≤13分)

1.2.10　高纤饮料稳定性试验

1.2.10.1　pH 的测定　取正交优化配方制备的高纤饮料（茶原液∶水=1∶1.5，木糖醇 8%，柠檬酸 0.06%，SDF 0.25%）150 mL，分装至 3 支 50 mL 无菌离心管中，密封后分为 3 组，置于 37 ℃ 恒温培养箱中避光储存。分别于第 0、3、7、14 d 参照《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》（GB 5009.237-2016）测定 pH，每组测定三次。

1.2.10.2　沉淀率测定　取测定 pH 后的样品 10 mL，4000 r/min 离心 15 min。根据公式计算沉淀率。

$$沉淀率(\%) = (m_1/m) \times 100 \qquad 式（11）$$

式中 m_1 为离心后沉淀物质量，m 为样品质量。

1.3　数据处理

所有试验均重复 3 次，所有数据均以平均数±标准差的形式呈现。以 $P<0.05$ 判断差异的显著性。采用 SPSS 21.0 进行数据统计及分析，GraphPad Prism 9.0 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　SDF 提取工艺优化

2.1.1　单因素实验　由图 2A 可得，随着 pH 的增加，SDF 提取率呈现先增加后降低的趋势，在 pH 为 3.0 时，SDF 提取率达到最高[30]，这可能是由于酸性条件可破坏麦麸中纤维素、半纤维素等细胞壁结构，促进 SDF 溶出；pH 过低时，酸解作用过强，因过度酸解导致 SDF 分子结构破坏，提取率增加缓慢；随着 pH 升高至 3.0，酸解作用适中，更多 SDF 被释放。pH 继续升高（pH>3.0）时，酸解作用减弱，细胞壁破坏不充分，提取率降低。由图 2B 可得，SDF 的提取率随着温度增加而增加，当温度为 90 ℃ 时，SDF 提取率达到最高，后又有所下降[31]。因为高温有利于促进分子的热运动，大量纤维素和半纤维素被破坏而析出，由于纤维素酶的改性作用，转化为 SDF[32]，提取率升高，温度超过 90 ℃后，可能导致酶失活或 SDF 分子因高温降解，提取率有所下降。从图 2C 中得出，随着时间的增加 SDF提取率呈现先升高后降低的趋势，并在处理时间为 1.5 h 达到最高。酸处理初期，时间延长可充分破坏纤维结构，释放更多 SDF；但超过 1.5 h 后，长时间酸解可能导致 SDF 分子间化学键断裂（如糖苷键），形成小分子碎片，降低 SDF 的溶解性和提取率。

2.1.2　正交试验结果　在单因素实验的基础上，选取 pH、温度、时间进行三因素三水平正交试验，进一步优化 SDF 提取工艺（表 5）。其中 T 为所有组试验提取率总和，y 为所有试验结果的总平均值，S 为各因素的离差平方和。根据极差（R）的大小，不同因素对可溶性膳食纤维的产率影响的主次顺序如下：pH>时间>温度。离差平方和（S）进一步验证，pH 对应的平方和远高于温度和时间，表明 pH 为影响提取率的极显著因素。以可溶性膳食纤维的产率为指标，最佳因素水平组合为酸处理时间 2 h，酸处理温度 100 ℃，pH2.0。

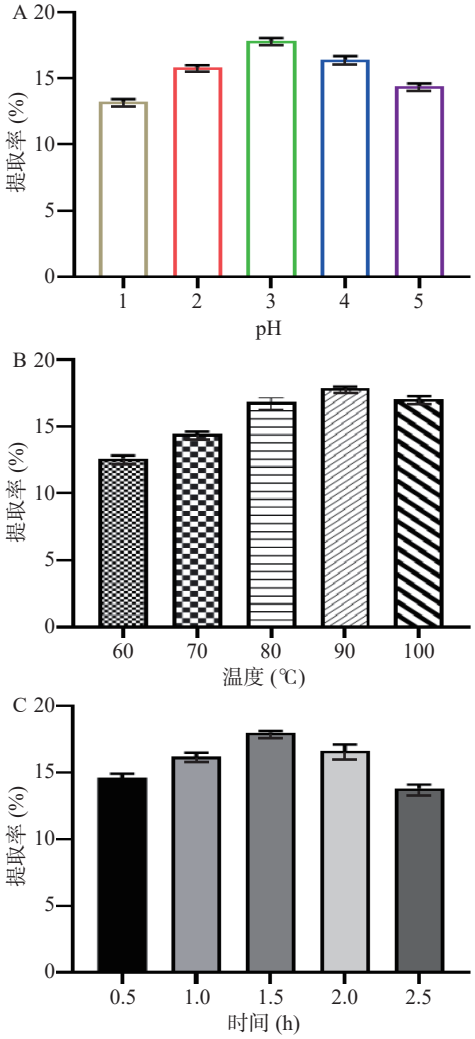


图 2　pH（A）、温度（B）、时间（C）分别对 SDF 提取的影响

Fig.2　Effects of pH (A), temperature (B), and time (C) on SDF extraction respectively

表 5　正交试验结果

Table 5　Orthogonal experiment results

实验号	pH	温度（℃）	时间（h）	提取率（%）
1	2	80	1	17.8
2	2	90	1.5	17.4
3	2	100	2	18.4
4	3	80	1	17.2
5	3	90	1.5	17.0
6	3	100	2	15.2
7	4	80	1	15.2
8	4	90	1.5	15.8
9	4	100	2	15.0
I	53.58	50.19	48.78	
II	49.38	50.19	49.59	
III	45.99	48.69	50.58	T=146
K_1	17.86	16.73	16.26	
K_2	16.46	16.73	16.53	
K_3	15.33	16.23	16.86	y=16.56
R	2.53	0.50	0.60	
S	9.64	0.50	0.54	

2.2 SDF 基本化学成分测定

为测定 SDF 纯度，本实验采用苯酚-硫酸法建立葡萄糖标准曲线如图 3 所示，R^2=0.9999，表明标准曲线拟合度良好。膳食纤维由 SDF 与 IDF 组成，本实验测得 SDF 的得率为 18.4%±0.78%，IDF 得率为 61%±1.25%，SDF 纯度为 52.4%±1.17%，水分含量 1.9%±0.12%、蛋白质 8.2%±0.21%，这些结果验证了酶-酸协同法提取 SDF 的高效性与可行性。SDF 得率通常与提取方法有关，陶志杰等[16] 通过酶-化学法提取麦麸 SDF，得率为 16.53%，低于本实验所得结果，进一步体现了本研究中酶-酸协同法在提高 SDF 得率方面具有一定的效果。闭琰炎等[14] 通过酶法提取玉竹可溶性膳食纤维并进行分离纯化，将纯度由 51.42% 提升为 83.23%，所以本课题组将在以后的研究中进一步纯化，将纯度提高。

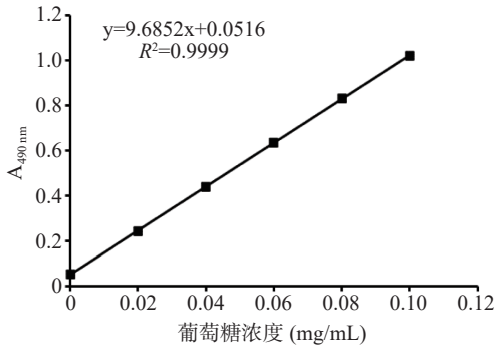


图 3 葡萄糖标准曲线

Fig.3 Glucose standard curve

2.3 SDF 的基本功能性测定

持水力、膨胀力和持油力是衡量可溶性膳食纤维品质的重要指标[33−34]。由表 6 可知 SDF 的持水性是 7.35 g/g，该值高于红花籽粕 SDF（5.58 g/g）和部分植物纤维[35]，研究表明麦麸 SDF 结构中富含羟基等亲水基团[36]，赋予其强大的水合能力。研究表明吸水后，SDF 分子链展开并通过氢键等相互作用形成高黏度凝胶网络[37]。这种凝胶结构不仅能增加饱腹感、延缓胃排空、促进肠道湿润以改善便秘，更重要的是，它在肠道内形成的黏稠环境显著增加了食糜黏度，其极大地延缓了葡萄糖分子向肠壁的扩散，从而有效平缓餐后血糖上升[38]。由表 6 可知，SDF 的持油性为 5.40 g/g，持油性较强，这是因为 SDF 中的纤维素可结合食物中的油脂，从而减少油脂吸收，辅助降低血脂。膨胀度为在水中膨胀的体积，反映纤维在肠道内的填充作用。由表 6 可知膨胀度为 5.89 mL/g，膨胀度较高，这与 SDF 中亲水基团吸水溶胀直接相关，膨胀后 SDF 可占据肠道空间，刺激肠道蠕动，加速食物残渣排出，与持水性共同作用，优化肠道传输功能[39]。由表 6 可知甘氨胆酸钠和牛磺胆酸钠的结合能力分别为 15.85%、18.14%，SDF 可结合肠道中的胆酸，减少其重吸收，促使肝脏利用胆固醇合成新胆酸，降低血液胆固醇水平，预防动脉粥样硬化。SDF 与亚硝酸盐结合能力较高，达到 43.80 μg/g，可减少其与胺类物质反应生成致癌物亚硝胺的风险。由表 6 可知，葡萄糖结合能力较高，达到 0.9 mmol/g，SDF 分子结构中的羟基（-OH）、羧基（-COOH）等极性基团可通过氢键与葡萄糖分子发生可逆性结合。这种直接相互作用，协同其形成高黏度凝胶网络所产生的强大扩散阻力，共同作用延缓了葡萄糖向肠道吸收表面的扩散速率，并可能在局部微环境中瞬时降低游离葡萄糖的有效浓度，从而减少其吸收效率，降低餐后血糖峰值[40−41]。

表 6 SDF 功能特性

Table 6 Functional properties of soluble dietary fiber (SDF)

持水性（g/g）	持油性（g/g）	膨胀度（mL/g）	胆酸结合能力(%)	亚硝酸盐结合能力（μg/g）	葡萄糖结合能力（mmol/g）
7.35±0.12	5.40±0.08	5.89±0.15	甘氨胆酸钠 15.85±0.31 牛磺胆酸钠 18.14±0.27	43.80±0.24	0.9±0.03

2.4 SDF 对葡萄糖扩散抑制能力

由图 4 可知，与对照组相比，透析 30 min 内，SDF 抑制葡萄糖扩散的能力最强，葡萄糖透析延迟系数达到最大值 88。在 60 min 内 SDF 对葡萄糖扩散的抑制效果显著但略欠佳，透析液中葡萄糖含量仍远少于对照组中葡萄糖含量；60 min 始，SDF 对葡萄糖的扩散抑制效果进一步减弱；90 min 后，SDF 对葡萄糖扩散的抑制效果几近于无。除了 SDF 自身与葡萄糖的结合之外，添加了 SDF 之后溶液的黏度升高，也是影响葡萄糖扩散的因素。当吸附达到饱和时，葡

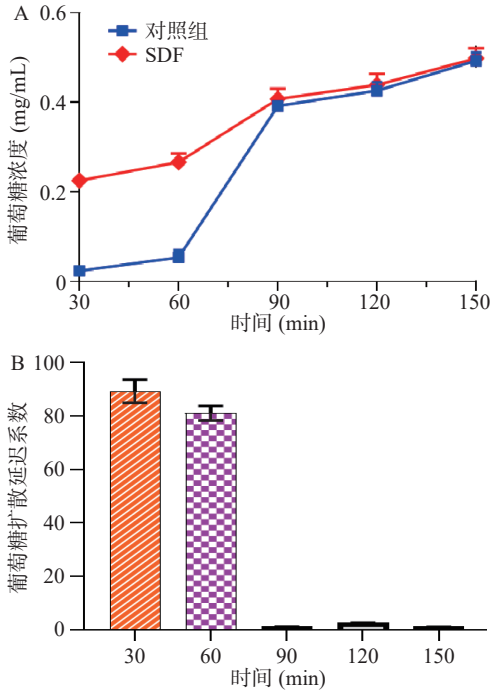


图 4 SDF 对葡萄糖扩散抑制能力

Fig.4 Inhibitory capacity of SDF against glucose diffusion

注：A. 葡萄糖含量；B. 葡萄糖扩散延迟系数。

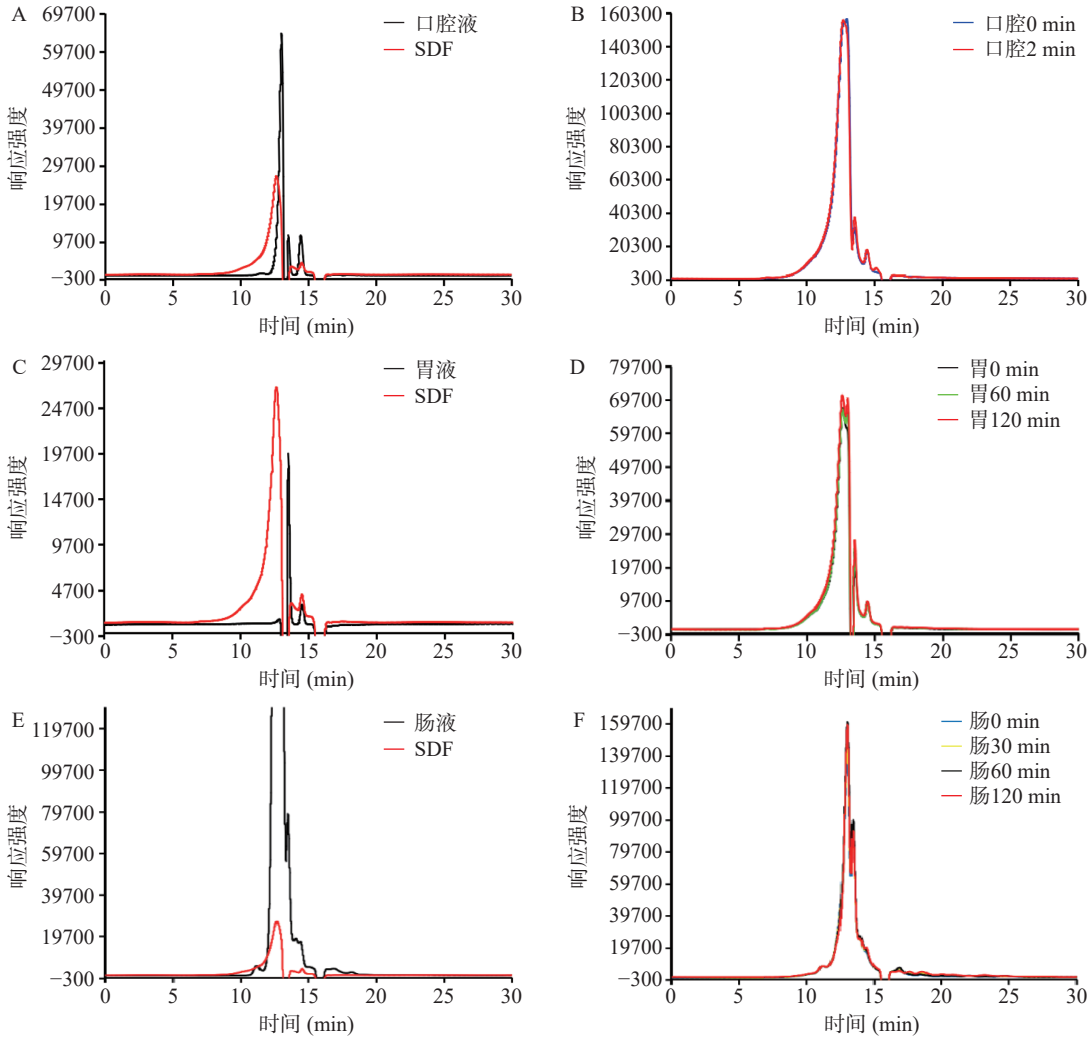


图 5　模拟消化后 SDF 分子量分布变化图

Fig.5　Changes in molecular weight distribution of SDF before and after simulated digestion

注：A. 口腔液与 SDF 的 HPGPC 色谱图；B. 口腔消化过程；C. 胃液与 SDF 的 HPGPC 色谱图；D. 胃液消化过程；E. 肠液与 SDF 的 HPGPC 色谱图；F. 肠液消化过程。

葡萄糖的扩散仅受黏度影响。试验结果证明 SDF 有抑制葡萄糖扩散和减少吸收的潜力。

2.5　抗体外消化能力测定

2.5.1　模拟消化后麸皮 SDF 的分子量分布变化　人体唾液成分复杂，关键酶为 α-淀粉酶，可以激活多糖中 α-(1,4)-键的水解。由图 5A 可知 SDF 在 HPGPC 色谱图中有单一主峰，保留时间为 15.2 min；口腔液也在 HPGPC 色谱图中有单一主峰，但保留时间为 18.5 min，两者的保留时间不同表明两者成分差异显著。图 5B 结果显示体外模拟唾液消化过程中，不同消化时间的保留时间(15.2 min)和反应值均无明显变化，说明唾液淀粉酶不能水解 SDF。从图 5C 可知胃液在 HPGPC 色谱图中也有 1 个主峰，与 SDF 主峰位置部分重叠(约 15.2 min)。图 5D 显示体外模拟胃液消化过程中，出现了连峰在 SDF 主峰位置。且随着消化时间的增加，连峰越明显，说明 SDF 中的糖苷键可以被胃液破坏，但破坏程度较轻。肠液图中 SDF 在 HPGPC 色谱图中的主峰与胃液在 HPGPC 色谱图中的主峰保留时间重合(15.2 min)，结果表明肠液中的酶和胆盐无法降解 SDF，其分子量分布在肠道环境中保持稳定。体外模拟消化试验结果表明，小麦麸皮 SDF 在口腔、胃和肠道消化体系中均表现出优异的抗消化特性，其分子量分布保持相对稳定，仅在胃消化阶段观察到轻微降解。

2.5.2　模拟消化后麸皮 SDF 的还原糖含量变化　根

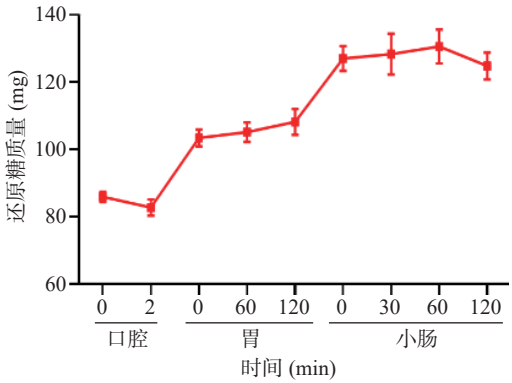


图 6　SDF 体外消化各阶段还原糖含量变化

Fig.6　Changes in reducing sugar content of SDF at various stages of *in vitro* digestion

据图 6 所示，在口腔阶段，还原糖含量保持稳定，表明 SDF 未受唾液淀粉酶影响；在胃阶段，还原糖含量仅小幅增加；进入小肠阶段后，还原糖含量重新趋于稳定。这一结果与分子量分布分析一致，证实 SDF 具有极强的抗消化性，能够完整抵达肠道发挥生理功能。

2.6 糊化后淀粉的消化程度

如图 7 所示 RDS（快消化淀粉）随着 SDF 的添加逐渐降低，RS（抗性淀粉）的含量逐渐升高，因为 SDF 降低了淀粉颗粒的糊化程度，这导致 RDS 的含量降低，SDF 和浸出直链淀粉之间通过氢键结合，包围了淀粉颗粒的表面，消化酶能水解淀粉的机会降低，这促进了 SDS（慢消化淀粉）和 RS 的增加，所以 SDF 可以减缓小麦淀粉的消化率。综上所述，SDF 有助于降低餐后血糖和胰岛素水平[42]。

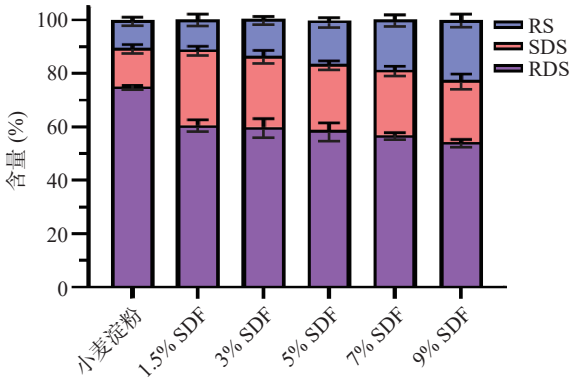


图 7 小麦淀粉及混合物的 RDS、SDS 和 RS 含量
Fig.7 Contents of RDS, SDS, and RS in wheat starch and its mixtures

2.7 糊化过程中直链淀粉浸出量

添加 SDF 会使体系黏度降低，可能是 SDF 附着在淀粉颗粒表面，使淀粉颗粒不论是在溶胀的过程中还是在糊化之后，交联程度均降低，所以体系的黏度降低。随着体系温度升高，淀粉颗粒发生溶胀，并伴随着直链淀粉的浸出。如图 8 所示，随着 SDF 的添加，浸出直链淀粉的量逐渐减少，且呈现浓度依赖性效应。在低浓度时，直链淀粉的浸出量较高，推测 SDF 的添加反而会促进淀粉吸水糊化，当 SDF 浓度>7% 时，直链淀粉浸出量降低，推测高浓度的 SDF 会结合糊化过程中溶出的直链淀粉附着在淀粉表面，从而减缓淀粉糊化[27]。

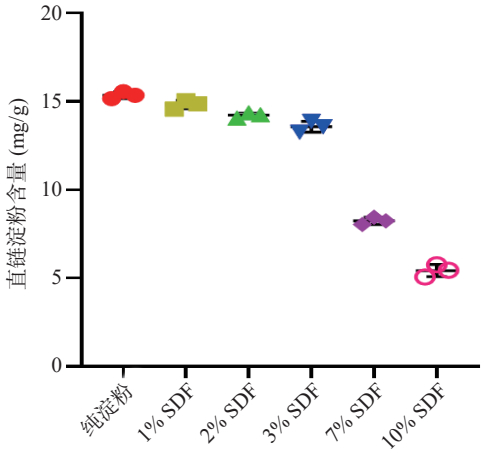
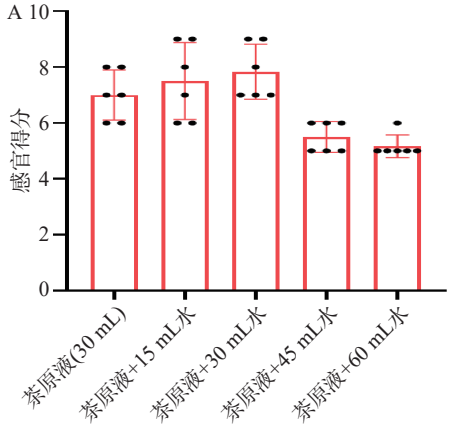


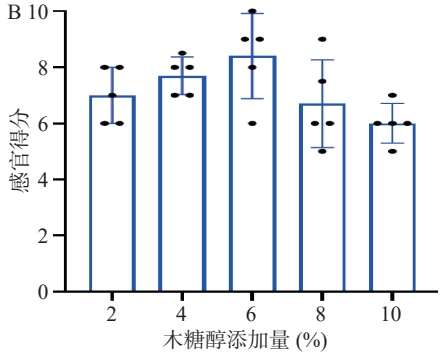
图 8 不同 SDF 浓度下小麦淀粉及混合物的直链淀粉浸出量
Fig.8 Amylose leaching amount in wheat starch and its mixtures at different SDF concentrations

2.8 高纤饮料研发

2.8.1 单因素实验 由图 9A 可知，随水的添加量增加，茶饮料口感越佳，当茶原液+水（30 mL）时得分最高，随后茶叶香气过淡，得分大幅降低。图 9B 显示随木糖醇添加量增加，茶饮料甜味越浓，苦味越淡，当木糖醇添加量为 6% 时，感官评分得分最高，超过 6% 时随木糖醇添加量增加茶饮料越甜腻，得分越低。图 9C 显示随柠檬酸的添加量增加，茶饮料酸味越浓，当柠檬酸添加量为 0.06% 时，茶饮料滋味最佳，酸甜适口、口感顺滑，当柠檬酸添加量超过 0.06% 后，随柠檬酸添加量增加，茶饮料越酸涩，同时激发出茶水的苦涩滋味。SDF 添加量对于茶饮料风味没有显著影响，但其对茶饮料的外观和状态有着重大影响。图 9D 显示 SDF 添加量为 0.75% 时，茶饮料感官评分最高，茶汤澄黄清澈，无沉淀浑浊，当 SDF 添加量超过 0.75% 后，随添加量增加，茶饮料越酸涩，同时激发出茶水的苦涩滋味。

2.8.2 正交试验 在完成单因素实验的基础上，研究选定水、木糖醇、柠檬酸及 SDF 作为配方优化的考





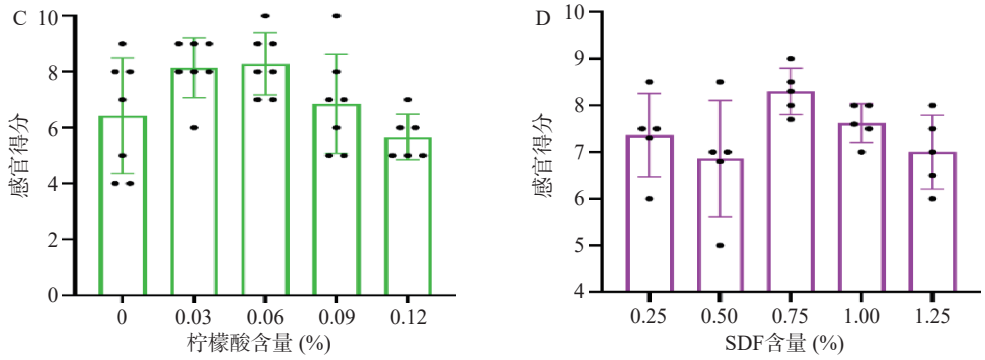


图 9　不同水添加量(A)、木糖醇添加量(B)、柠檬酸含量(C)、SDF 含量(D)分别对感官评分的影响

Fig.9　Effects of different water addition amounts (A), xylitol addition amounts (B), citric acid contents (C), and SDF contents (D) on sensory score respectively

察因素，针对各因素分别设置三个水平，进而开展四因素三水平的正交试验设计，以实现高纤饮料配方的进一步优化。由表 7 可知，各因素对小麦麸皮可溶性膳食纤维茶饮料配方的影响程度排序为：水>SDF>柠檬酸>木糖醇。最佳配方为茶原液∶纯净水=1∶1.5、木糖醇 8%(m/V)、柠檬酸 0.06%(m/V)、SDF 0.25%(m/V)，该配方产品风味最佳。

表 7　正交试验结果

Table 7　Orthogonal experiment results

序号	A水	B木糖醇	C柠檬酸	D SDF	感官评分(分)
1	1	1	1	1	78.28
2	1	2	2	2	80
3	1	3	3	3	80
4	2	1	2	3	81
5	2	2	3	1	86.43
6	2	3	1	2	81.57
7	3	1	3	2	89.14
8	3	2	1	3	82.86
9	3	3	2	1	92.57
k1	79.427	82.807	80.903	85.760	
k2	83.000	83.097	84.523	83.570	
k3	88.190	84.713	85.190	81.287	
极差	8.763	1.906	4.287	4.473	

2.8.3　验证试验结果　根据最佳感官评价条件组合进行验证试验，该组合条件为茶原液∶纯净水=1∶1.5、木糖醇 8%(m/V)、柠檬酸 0.06%(m/V)、SDF 0.25%(m/V)。平行三组，测得感官评分均值为 93±0.21 分，显著高于正交试验各组，得到口感顺滑，酸甜适口的高纤饮料，表明正交优化得到的工艺条件可行。

2.9　高纤饮料稳定性试验

2.9.1　pH 测定　如图 10 所示，在 14 d 内，高纤维饮料的 pH 随时间呈现缓慢且均匀的上升趋势(从 3.52 至 3.91)，未出现急剧跳跃或突然变化，表明体系内部反应是缓慢和可控的，这种缓慢变化的趋势说明产品在贮藏期内保持了较好的化学稳定性[43]。总之，稳定性结果与感官评价结果相一致，证明了高纤饮料配方的合理性。

2.9.2　沉淀率测定　如图 11 所示，14 d 内，随着时间的增加，沉淀率逐渐升高但最终为 4.80%，符合

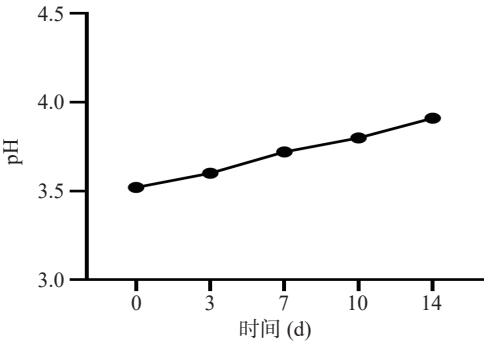


图 10　高纤饮料 pH 变化

Fig.10　pH changes of high-fiber beverage

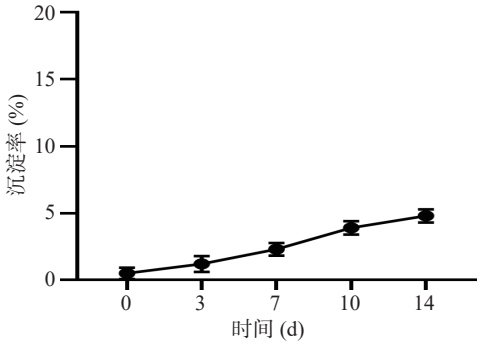


图 11　高纤饮料沉淀率变化

Fig.11　Changes in precipitation rate of high-fiber beverages

GB/T 31326-2014《植物饮料》标准中允许谷物及膳食纤维饮料存在“少量微小沉淀”的感官要求，且数值远低于行业通行的离心沉淀率稳定性临界标准(5%)，表明该产品稳定性良好。

3　结论

本研究通过酶-酸协同法，从小麦麸皮中提取可溶性膳食纤维(SDF)，通过单因素实验及正交试验得到 SDF 最高提取率达 18.4%±0.78%，水分含量 1.9%±0.12%、蛋白质含量 8.2%±0.21%。功能特性分析表明，SDF 具有优异的持水性(7.35 g/g)、持油性(5.40 g/g)和膨胀度(5.89 mL/g)，且 SDF 对胆酸盐、亚硝酸盐及葡萄糖表现出显著结合能力。此外，SDF还可抑制葡萄糖的扩散以及影响淀粉的消化特性，使 RDS 的比例降低 22.7%，使 SDS 和 RS 的比例

分别增加 31.5% 和 18.9%，显著延缓淀粉的消化进程，且自身具有抗消化性。基于 SDF 的功能特性，通过单因素实验和正交试验优化出高纤饮料最佳配方为茶原液∶纯净水=1∶1.5、木糖醇 8%(m/V)、柠檬酸0.06%(m/V)、SDF 0.25%(m/V)，产品感官评分93分，该配方产品澄黄清澈、酸甜口感优良，稳定性较好。本方法的提取比单一化学法或酶法所得提取率要高，其持水性和膨胀度、持油性都会有所提升，此外其与胆酸盐等的结合能力较强。如 QIN 等[44]通过感应电场等物理方法，提取麦麸中的 SDF，使其提取率从 7.69% 增加到 12.02%，低于本方法对麦麸的提取率；如 SHEN 等[45] 通过超声-微波法提取黑大豆壳中的 SDF，其持水性、吸水性和持油性分别为 3.79 g/g、1.39 mL/g 和 1.14 g/g，分别比原始 SDF 值增加了 9.54%、23.01% 和 17.53%，且其效果要比单一酶法的胆固醇结合能力要强，所以联合提取要比单一提取效果要好；本研究建立了小麦麸皮 SDF 从提取到应用的全链条技术体系，显著提升了小麦麸皮 SDF 的提取效率与功能价值，揭示小麦麸皮 SDF 对淀粉消化进程的抑制作用机制，为膳食纤维调控血糖提供新证据。本研究仍存在一定的局限，目前功能评价仅基于体外模拟实验，缺乏动物及人体临床试验验证其体内血糖调控效果。所以未来可开展动物模型及临床研究，验证麦麸 SDF 在体内的血糖调节活性及安全性；还可通过核磁共振(NMR)、扫描电镜(SEM)等技术解析 SDF 的精细结构，阐明结构-功能的定量关系；不断优化规模化提取工艺，降低生产成本，并拓展其在烘焙食品、保健食品等领域的应用，推动麦麸资源从低值化利用向高附加值功能成分的深度转化。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 全文彬, 王娟, 黄继红, 等. 小麦麸皮可溶性膳食纤维的理化性质和结构表征[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 259−265. [QUAN Wenbin, WANG Juan, HUANG Jihong, et al. Physicochemical properties and structural characterization of soluble dietary fiber of wheat bran[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(21): 259−265.]

[2] 苗宇叶, 刘阳星月, 姚亚亚, 等. 麦麸营养成分的利用及改性现状[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(12): 18−20. [MIAO Ziye, LIU Yangxingyue, YAO Yaya, et al. Utilization and modification status of wheat bran nutrient[J]. Cereals and Oils, 2020, 33(12): 18−20.]

[3] 周丽媛, 李宁阳, 徐晶晶, 等. 黑小麦麸皮可溶性膳食纤维改性制备及性质研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(9): 7−14. [ZHOU Liyuan, LI Ningyang, XU Jingjing, et al. Auxiliary extraction of soluble dietary fiber from black wheat bran and its properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(9): 7−14.]

[4] 郭苗苗, 吕晓玲, 刘杰, 等. 响应面优化研究小麦麸皮可溶性膳食纤维的提取工艺[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 130−133. [GUO Miaomiao, LÜ Xiaoling, LIU Jie, et al. Studies on extraction of soluble dietary fiber from wheat bran by response surface methodology[J]. The Food Industry, 2015, 36(1): 130−133.]

[5] 梁婷婷, 王倩, 邹葭霜, 等. 麦麸有效成分及提取工艺研究进展[J]. 特产研究, 2025, 47(3): 177−184. [LIANG Tingting, WANG Qian, ZOU Jiaxia, et al. Research progress on effective components and extraction technology of wheat bran[J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2025, 47(3): 177−184.]

[6] 朱丹, 朱立斌, 牛广财, 等. 沙果渣膳食纤维超高压处理条件优化及其微观结构表征[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(1): 118−126. [ZHU Dan, ZHU Libin, NIU Guangcai, et al. Optimization on ultra high pressure processing conditions and microstructural characteristics of the dietary fiber from *Malus asiatica* Nakai residue[J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(1): 118−126.]

[7] 陈思妤, 焦叶, 崔波, 等. 膳食纤维理化特性及其改性方法研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 234−240. [CHEN Siyu, JIAO Ye, CUI Bo, et al. Research progress in physicochemical properties and modification methods of dietary fiber[J]. Food and Machinery, 2022, 38(5): 234−240.]

[8] 李蕴, 张秀丽. 纤维素酶法提取黑豆中可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 79−82. [LI Yun, ZHANG Xiuli. Study on the extraction process of soluble dietary fiber from black soybean by cellulase method[J]. Cereals and Oils, 2020, 33(7): 79−82.]

[9] 李晓宁, 郭咪咪, 段章群. 酸法制取大豆皮可溶性膳食纤维[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 32−35,51. [LI Xiaoning, GUO Mimi, DUAN Zhangqun. Preparation of soluble dietary fiber from soybean hull by acid hydrolysis method[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 32−35,51.]

[10] 陈创业, 安比芳, 冯作山, 等. 响应面法优化酶-化学法提取玫瑰花渣中可溶性膳食纤维[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(3): 91−94. [CHEN Chuangye, AN Bifang, FENG Zuoshan, et al. Optimization of enzyme-chemical method extraction of soluble dietary fiber from rose dregs by response surface method[J]. Grains and Oils, 2024, 37(3): 91−94.]

[11] 谢瑶, 张志飞, 王泉博, 等. 可溶性膳食纤维在便秘小鼠模型和便秘人群中的作用和机制研究[J]. 山东科学, 2025, 38(4): 28-38. [XIE Yao, ZHANG Zhifei, WANG Quanbo, et al. A study on the role and mechanism of soluble dietary fiber in a mouse constipation model and constipated human population[J]. Shandong Science, 2025, 38(4): 28−38.]

[12] 赵文婧, 陈立英. 谷子可溶性膳食纤维的理化性质、结构表征及对 7 种肠道菌群体外生长的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 92−102. [ZHAO Wenjing, CHEN Liying. Physical and chemical properties and structural characterization of soluble dietary fiber from millet and its effects on the growth of seven kinds of intestinal bacteria *in vitro*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 92−102.]

[13] 何姗珊, 刘利平, 刘艳芳, 等. 鹿茸菇可溶性膳食纤维生物活性及结构特征分析[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 39−47. [HE Shanshan, LIU Liping, LIU Yanfang, et al. Bioactivity and structural characterization of soluble dietary fiber from *Lyophyllum decastes*[J]. Food Science, 2025, 46(9): 39−47.]

[14] 闭琰炎, 汤悦飞, 张红, 等. 玉竹可溶性膳食纤维的分离提纯及其生物活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(21): 225−231. [BI Yanyan, TANG Yuefei, ZHANG Hong, et al. Isolation, purification, and biological activity of soluble dietary fiber from *Polygo-*

natum odoratum[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(21): 225−231.]
[15] 蔺艳君, 刘丽娅, 钟葵, 等. 不同来源小麦麸皮营养成分及酚类物质含量的比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 194−200. [LIN Yanjun, LIU Liya, ZHONG Kui, et al. Comparison of nutritional and phenolic content of wheat bran obtained from different sources[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 194−200.]
[16] 陶志杰, 王改玲, 王家良, 等. 酶-化学法优化麦麸可溶性膳食纤维提取工艺[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(1): 43−46. [TAO Zhijie, WANG Gailing, WANG Jialiang, et al. Optimization of soluble dietary fiber extraction process from wheat bran by enzymatic-chemical method[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2019, 35(1): 43−46.]
[17] ZHANG Yue, QI Junru, ZENG Weiqi, et al. Properties of dietary fiber from *Citrus* obtained through alkaline hydrogen peroxide treatment and homogenization treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125873.
[18] LI Yinxia, NIU Li, GUO Qianqian, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran[J]. Lwt, 2022, 154: 112609.
[19] KHAN G M, KHAN N M, KHAN Z U, et al. Effect of extraction methods on structural, physiochemical and functional properties of dietary fiber from defatted walnut flour[J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27(4): 1015−1022.
[20] 华梅, 樊美玲, 卢佳希, 等. 七种药食两用中药膳食纤维体外抗氧化及胆酸盐结合能力研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 314−320. [HUA Mei, PAN Meiling, LU Jiaxi, et al. Study on the *in vitro* antioxidant and bile salts binding activity of the dietary fibers from seven edible raditional chinese medicines[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 314−320.]
[21] 尚学钰, 美合日班, 苏玲, 等. 黑木耳可溶性膳食纤维功能特性和降脂活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 112−121. [SHANG Xueyu, MEI Heriban, SU Ling, et al. Functional characteristics and lipid lowering activity of *Auricularia heimuer* soluble dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 112−121.]
[22] LUO Xianliang, WANG Qi, FANG Dongya, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1461−1467.
[23] GAN Jiapan, HUANG Ziyan, YU Qiang, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105549.
[24] MA Mengmei, MU Taihua, SUN Hongnan, et al. Optimization of extraction efficiency by shear emulsifying assisted enzymatic hydrolysis and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin (*Cuminum cyminum* L.)[J]. Food Chemistry, 2015, 179: 270−277.
[25] 岑勤. 灵芝发酵红薯渣改性可溶性膳食纤维降淀粉消化率的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024: 58−59. [CEN Qin. Study on modification of soluble dietary fiber from *Ganoderma lucidum*-fermented sweet potato residue and its effect on reducing starch digestibility[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024: 58−59.]
[26] 刁春仁. 藕渣可溶性膳食纤维的提取分离、结构表征及其对肠道微生物的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2019: 21−22. [DIAO Chunren. Extraction, separation and structural characterization of soluble dietary fiber from lotus root dregs and its effects on intestinal microflora[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019: 21−22.]
[27] KONG Xiangru, ZHU Zhenyuan, ZHANG Xiaojing, et al. Effects of *Cordyceps* polysaccharides on pasting properties and *in vitro* starch digestibility of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105604.
[28] WANG Nan, HUANG Shan, ZHANG Yue, et al. Effect of supplementation by bamboo shoot insoluble dietary fiber on physicochemical and structural properties of rice starch[J]. Lwt, 2020, 129: 109509.
[29] BAE I Y, JUN Yujin, LEE S, et al. Characterization of apple dietary fibers influencing the *in vitro* starch digestibility of wheat flour gel[J]. Lwt, 2016, 65: 158−163.
[30] 闵钟嫚, 高路, 高育哲, 等. 黑曲霉发酵法制备米糠粕可溶性膳食纤维工艺优化及其理化分析[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 112−118. [MIN Zhongman, GAO Lu, GAO Yuzhe, et al. Optimization of the preparation process for soluble dietary fiber from rice bran by *Aspergillus niger* fermentation and its physicochemical properties[J]. Food Science, 2018, 39(2): 112−118.]
[31] 王凌翌, 周利琴, 刘志国, 等. 联合酶法提取豆渣蛋白肽和可溶性膳食纤维[J]. 中国油脂, 2021, 46(6): 114−118. [WANG Lingyi, ZHOU Liqin, LIU Zhiguo, et al. Extraction of protein peptides and soluble dietary fiber from soybean dregs by combined enzymatic method[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(6): 114−118.]
[32] 王磊, 董李学, 王建华, 等. 蒸汽爆破与酶解耦合制备花生壳膳食纤维[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 26−29. [WANG Lei, DONG Lixue, WANG Jianhua, et al. Steam explosion-enzyme extraction of dietary fiber from peanut shell[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 26−29.]
[33] 郭娅, 过利敏, 周玉岩, 等. 改性方式对红花籽粕可溶性膳食纤维理化性质和吸附特性的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(5): 137−142. [GUO Ya, GUO Limin, ZHOU Yuyan, et al. Effects of modification methods on physicochemical properties and adsorption of soluble dietary fiber from safflower seed meal[J]. China Brewing, 2022, 41(5): 137−142.]
[34] 沈康, 贺灵灵, 晁增友, 等. 西梅可溶性膳食纤维的提取及其理化特性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(9): 128−136. [SHEN Kang, HE Lingling, CHAO Zengyou, et al. Extraction and physicochemical properties of soluble dietary fiber from prune[J]. Food Research and Development, 2023, 44(9): 128−136.]
[35] 官印珑, 周丽妍, 王辉, 等. 动态高压微射流对刺梨果渣膳食纤维及其抑制淀粉消化和葡萄糖扩散的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 79−86. [GUAN Yinlong, ZHOU Liyan, WANG Hui, et al. Impact of dynamic high pressure microfluidization on dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt. pomace and its inhibitory capacity against starch digestion and glucose diffusion[J]. Food Science, 2022, 43(9): 79−86.]
[36] 徐丽娜, 张宁, 杨国燕, 等. 麦麸可溶性和不溶性膳食纤维对小麦淀粉性质的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(1): 25−29,78. [XU Lina, ZHANG Ning, YANG Guoyan, et al. The effect of soluble and insoluble dietary fiber from wheat bran on the properties of wheat starch[J]. Cereals and Oils, 2024, 37(1): 25−29,78.]
[37] 朱宣宣. 酶-酸联合处理麦麸膳食纤维及其对面条品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022. [ZHU Xuanxuan. Effects of enzyme-acid combined treatmenton dietary fiber of wheat bran and qualities of corresponding noodles[D]. Zhenghou: Henan University of Technology, 2022.]
[38] 李淑敏, 宋志英. 膳食纤维对妊娠期糖尿病影响的研究进展[J]. 临床医学进展, 2023, 13(6): 9000−9006. [LI Shumin, SONG

Zhiying. Research progress on the effect of dietary fiber on gestational diabetes mellitus[J]. Advances in Clinical Medicine, 2023, 13(6): 9000−9006.]

[39] 邱霞, 张德蒙, 高翔宇, 等. 褐藻膳食纤维对糖脂代谢调节作用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(1): 51−56. [QIU Xia, ZHANG Demeng, GAO Xiangyu, et al. Research progress of alginate in regulating glucose and lipid metabolism[J]. Food and Nutrition in China, 2023, 29(1): 51−56.]

[40] TOSH S M, BORDENAVE N. Emerging science on benefits of whole grain oat and barley and their soluble dietary fibers for heart health, glycemic response, and gut microbiota[J]. Nutrition Reviews, 2020, 78(Supplement_1): 13−20.

[41] 王艳峰, 杨锡洪, 曹峻菡, 等. 膳食纤维调节 2 型糖尿病血糖作用研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 6−11,17. [WANG Yanfeng, YANG Xihong, CAO Junhan, et al. Research progress on the mechanism of dietary fiber in regulating blood sugar of type 2 diabetes[J]. Food and Machinery, 2020, 36(10): 6−11,17.]

[42] 王晓梅, 木泰华, 李鹏高. 膳食纤维防治糖胖症及其并发症的研究进展[J]. 核农学报, 2013, 27(9): 1324−1330. [WANG Xiaomei, MU Taihua, LI Penggao. Research progress in prevention and treatment of diabesity and the complications thereof by dietary fiber: A literature review[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(9): 1324−1330.]

[43] 成官哲, 薛玉清, 李言郡, 等. 柑橘纤维基础特性研究及其在 PET 酸性乳饮料中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 149−156. [CHENG Guanzhe, XUE Yuqing, LI Yanjun, et al. Research on the basic characteristics of citrus fiber and its application in PET acidic milk beverages[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 149−156.]

[44] QIN Shaoshuang, LI Ming, YANG Yulu, et al. Effect of induced electric field treatment on structural and physicochemical properties of wheat bran to enhance soluble dietary fiber content[J]. Food Research International, 2025, 201: 115618.

[45] SHEN Meng, WANG Weihao, CAO Longkui. Soluble dietary fibers from black soybean hulls: Physical and enzymatic modification, structure, physical properties, and cholesterol binding capacity[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(6): 1668−1674.