王萌, 刘泉, 郑喜群, 等. 高温蒸煮联合超声复合酶法改性麦麸膳食纤维工艺优化及体外益生活性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 266−276. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020204
WANG Meng, LIU Quan, ZHENG Xiqun, et al. Modifying Wheat Bran Dietary Fiber Using High-temperature Steaming with Ultrasound-assisted Compound Enzymatic Method: Process Optimization and Effects on *in Vitro* Probiotic Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 266−276. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020204

·工艺技术·

高温蒸煮联合超声复合酶法改性麦麸膳食纤维工艺优化及体外益生活性

王　萌[1], 刘　泉[1], 郑喜群[1,2], 姜彩霞[2,3], 王俊彤[1,2,4,*], 胡　昊[5,*], 张　智[5]
（1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;
2.粮食副产物加工与利用教育部工程研究中心, 黑龙江大庆 163319;
3.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;
4.黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319;
5.黑龙江省北大荒米业集团有限公司, 黑龙江哈尔滨 150090）

摘　要: 本研究以脱脂麦麸为原料，采用高温蒸煮结合超声复合酶法对麦麸进行改性处理。探讨了不同因素对可溶性膳食纤维（soluble dietary fiber，SDF）得率的影响，并对比分析了改性前后膳食纤维的理化特性及其对体外益生菌活性的作用。结果表明，高温蒸煮联合超声复合酶法可使麦麸 SDF 得率提升至 34.31%±0.08%。最佳工艺参数为：料液比 1∶10 g/mL，高温蒸煮温度 120 ℃、时间 30 min，超声功率 450 W、时间 9 min、温度 45 ℃，复合酶（纤维素酶与半纤维素酶）配比 1∶1，复合酶添加量 2.5%（w/w）。改性后，SDF 的持水力、持油力和膨胀力分别提升至改性前的 1.75 倍、1.57 倍和 1.36 倍；不溶性膳食纤维（insoluble dietary fiber，IDF）的持水力、持油力和膨胀力分别提升至改性前的 1.15 倍、1.28 倍和 1.09 倍。此外，改性后的 SDF 和 IDF 显著增强了嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的生长及黏附能力。本研究为小麦麸皮膳食纤维的高值化利用提供了理论支持。

关键词: 小麦麸皮, 膳食纤维, 高温蒸煮, 超声复合酶解, 联合改性, 益生特性
中图分类号: TS210.9　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0266−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020204　　本文网刊:

Modifying Wheat Bran Dietary Fiber Using High-temperature Steaming with Ultrasound-assisted Compound Enzymatic Method: Process Optimization and Effects on *in Vitro* Probiotic Activity

WANG Meng[1], LIU Quan[1], ZHENG Xiqun[1,2], JIANG Caixia[2,3], WANG Juntong[1,2,4,*], HU Hao[5,*], ZHANG Zhi[5]
（1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2.Engineering Research Center of Processing and Utilization of Grain By-products and Utilization of Ministry of Education, Daqing 163319, China;
3.National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
4.Key Laboratory of Agro-products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China;
5.Heilongjiang Beidahuang Rice Industry Group Co., Ltd., Harbin 150090, China）

Abstract: Defatted wheat bran was modified via high-temperature steaming combined with ultrasound-assisted enzymatic

收稿日期: 2025−02−26
基金项目: 国家十四五重点研发计划子课题（2021YFD2100904）; 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目（YJSCX2023-Y47）。
作者简介: 王萌（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1752824284@qq.com。
*** 通信作者:** 王俊彤（1987−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 粮食副产物加工及蛋白质功能因子开发, E-mail: wangjuntong1248@163.com。
胡昊（1976−）, 男, 硕士, 高级农艺师, 研究方向: 粮食加工; E-mail: lkaahuhao@163.com。

treatments. We investigated the influence of various factors on the yield of soluble dietary fiber (SDF). The physicochemical properties of dietary fibers before and after modification and their effects on *in vitro* probiotic activity were comparatively analyzed. Steaming coupled with ultrasound-assisted enzymatic treatment increased the yield of wheat bran SDF by 34.31%±0.08%. The optimal process parameters were as follows: liquid-to-solid ratio was 1∶10 g/mL, steaming temperature was 120 ℃, steaming duration was 30 min, ultrasound power was 450 W, ultrasound treatment duration was 9 min, ultrasound treatment temperature was 45 ℃, enzyme component (cellulase to hemicellulase) ratio was 1∶1, and compound enzyme dosage was 2.5% (w/w). The water-holding, oil-holding, and swelling capacities of the SDF increased by 1.75-, 1.57-, and 1.36-fold relative to the premodification values after modification, respectively. The water-holding, oil-holding, and swelling capacities of insoluble dietary fiber (IDF) increased by 1.15-, 1.28-, and 1.09-fold, respectively, compared with the premodification values. Modified SDF and IDF substantially enhanced the growth and adhesive capacities of *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium longum*. These results provide a theoretical basis for the high-value use of wheat bran dietary fiber.

Key words: wheat bran; dietary fiber; high temperature steaming; ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis; combined modification; probiotic activity

膳食纤维是一种在小肠内不易被消化，在大肠内易被发酵分解的碳水化合物[1]。膳食纤维按溶解度的不同可分为可溶性膳食纤维（soluble dietary fiber, SDF）与不可溶性膳食纤维（insoluble dietary fiber, IDF），其比例在 1∶9 左右[2]。IDF 具有调控肠道菌群，促进肠道蠕动及增加粪便体积的作用，而 SDF 则在免疫调节、血糖控制及凝胶形成等方面表现出更显著的功能优势[3]。SDF 具有更强的生理活性，因此 SDF 含量越高，膳食纤维品质越好。

麦麸作为小麦加工的主要副产物，目前主要被用作牲畜饲料和发酵基质，仅有少量经过简单加工后应用于食品工业[4−5]。这种低附加值的利用方式严重限制了麦麸资源的经济效益。然而，麦麸富含膳食纤维，但天然状态下其 SDF 含量较低且功能特性有限，这直接制约了在功能食品领域的开发应用[6]。研究表明，通过适当的改性处理既可以提高麦麸中 SDF 的含量，又可以改善其理化性质并增强生理活性功能。

目前，改性膳食纤维的研究主要采用物理法（如超声波、高温蒸煮和高压均质）、生物法（以酶法和发酵法为主）以及化学法（主要为酸碱法）等多种方法[7−8]。然而，单一方法存在局限性：物理法设备要求高、能耗大；生物法条件苛刻且生产周期长；化学法可能破坏营养成分并具有强腐蚀性。为克服这些不足，多种方法联合使用已成为趋势，其能够实现更高效、温和且低能耗的改性效果[9]。例如，Huang 等[10]通过高温蒸煮辅助酶法显著提高了茶渣 SDF 得率并改善了其功能特性；Jiang 等[11]通过超声-微波协同改性玉米皮膳食纤维，结果表明，超声微波协同修饰可以增强嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的促生长能力和吸附能力。巫永华等[12]对黑豆皮采用超声微波辅助酶法制备 SDF 得率达 19.12%，其膨胀力、持水力和吸附力均得到明显提高。谢翎等[13]通过将高温改性技术与超声波辅助酶解技术相结合，从每 10 g 豆渣原料中获得了 3.91 g SDF，显著提高了 SDF 得率和持水、膨胀性；还发现复合改性方法能够有效克服单一方法的不足，充分发挥协同效应。

高温蒸煮能够有效破坏细胞壁，导致纤维素、半纤维素和木质素的糖苷键断裂，促使 IDF 部分降解转化为 SDF；超声复合酶处理则通过空化效应和酶促反应进一步分解 IDF，提高 SDF 得率并改善其功能特性[14]。通过预实验发现，高温蒸煮联合超声复合酶解协同作用下的 SDF 得率显著高于单独使用高温蒸煮（SDF 得率 24.5%）或超声复合酶解（SDF 得率 17.2%）。在本研究中，以脱脂麦麸为原料，通过单因素实验、Plackett-Burman 试验和响应面试验对高温蒸煮和超声复合酶解两步改性工艺进行了系统优化。此外，课题组详细研究了改性前后麦麸 SDF 和 IDF 的理化性质及其体外益生活性。本研究旨在为麦麸的高值化利用提供理论依据，并为食品工业提供新的膳食纤维来源。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

小麦麸皮（膳食纤维 68%，w/w）　南顺（四川）食品有限公司；纤维素酶（50000 U/g）、半纤维素酶（20000 U/g）　源叶生物科技有限公司；碱性蛋白（200000 U/g）　南宁东恒华道生物科技有限公司；α-淀粉酶（3700 U/g）　北京奥博星生物技术有限公司；嗜酸乳杆菌（BNCC336636）、长双歧杆菌（BNCC187962）　北纳生物科技有限公司（北京）；菊粉　河南优昂生物科技有限公司；其他化学试剂均为国产分析纯。

SX-300 型蒸汽灭菌器　天美（中国）科学仪器有限公司；NAI-CS900 超声波细胞破碎仪　上海那艾精密仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　麦麸预处理方法　将麦麸干燥后粉碎并过筛，按 1∶10 g/mL 的料液比加入石油醚提取 6 h，悬浮液以 4000 r/min 离心 15 min（重复 3 次），收集滤饼晾干，粉碎后过 60 目筛，密封保存备用。

1.2.2　未改性麦麸 SDF 和 IDF 的制备　脱脂麦麸

中含有一定量的淀粉(约 13%)和蛋白质(约 10%)[15],为了提高最终产物膳食纤维含量,参考张媛媛等[16]方法,分别利用 α-淀粉酶和碱性蛋白酶去除脱脂麦麸中的淀粉和蛋白质。具体制备方法如下:脱脂麦麸按照 1∶10 g/mL 的料液比加蒸馏水混合均匀,随后依次加入 0.6% 的 α-淀粉酶(60 ℃, pH6.5)和 0.4% 的碱性蛋白酶(52 ℃, pH9),分别水解 1 h 后,沸水浴灭酶 10 min。冷却至室温后,以 4400 r/min 离心 15 min。沉淀即未改性的麦麸不可溶性膳食纤维(unmodified insoluble dietary fiber, U-IDF)。将上清液浓缩至原来的 1/3 体积,添加 4 倍 95% 乙醇溶液,醇沉 12 h 后离心。沉淀物经冷冻干燥后得到未改性的麦麸可溶性膳食纤维(unmodified soluble dietary fiber, U-SDF)。

1.2.3 高温蒸煮联合超声复合酶法改性麦麸 SDF 和 IDF 的制备 参照孙静等[17]和赵匀淑等[18]的试验方法并进行适当修改。脱脂麦麸按照 1∶10 g/mL 的料液比加蒸馏水混匀,置于高压灭菌锅中。在一定温度下处理一段时间,反应结束后冷却,依次加入 0.6% α-淀粉酶酶解(60 ℃, pH6.5)和 0.4% 的碱性蛋白酶(52 ℃, pH9)各进行水解 1 h 后灭酶 10 min。经过超声处理一定时间后,调节溶液 pH 至 4.8,在 50 ℃ 条件下加入适量纤维素酶与半纤维素酶进行复合酶解。酶解完成后,沸水浴 10 min 灭酶,后续操作同 1.2.2,最终获得改性后的麦麸不溶性膳食纤维(modified insoluble dietary fiber, M-IDF)和可溶性膳食纤维(modified soluble dietary fiber, M-SDF)。

1.2.4 高温蒸煮改性阶段的工艺优化 脱脂麦麸按照 1∶10 g/mL 的料液比加蒸馏水混合,设定蒸煮时间为 30 min,考察蒸煮温度(110、115、120、125 和 130 ℃)对 SDF 得率的影响;在蒸煮温度为 120 ℃ 的条件下,探究蒸煮时间(10、20、30、40 和 50 min)对 SDF 得率的作用。

1.2.5 超声复合酶法改性阶段的工艺优化 在 1.2.4 中所得的高温蒸煮改性条件基础上继续进行超声复合酶法改性研究。

1.2.5.1 单因素实验 在料液比固定为 1∶10 g/mL、超声时间 9 min、超声温度 35 ℃、复合酶配比 1∶1、复合酶添加量 1.5% 的条件下,研究不同超声功率(270、360、450、540 和 630 W)对 SDF 得率的影响。

在料液比固定为 1∶10 g/mL、超声功率 540 W、超声温度 35 ℃、复合酶配比 1∶1、复合酶添加量 1.5% 的条件下,研究不同超声时间(5、7、9、11 和 13 min)对 SDF 得率的影响。

在料液比固定为 1∶10 g/mL、超声功率 540 W、超声时间 9 min、复合酶配比 1∶1、复合酶添加量 1.5% 的条件下,研究不同超声温度(25、30、35、40 和 45 ℃)对 SDF 得率的影响。

在料液比固定为 1∶10 g/mL、超声功率 540 W、超声时间 9 min、超声温度 40 ℃、复合酶添加量 1.5% 的条件下,研究不同复合酶配比(3∶1、2∶1、1∶1、1∶2 和 1∶3)对 SDF 得率的影响。

在料液比固定为 1∶10 g/mL、超声功率 540 W、超声时间 9 min、超声温度 40 ℃、复合酶配比 1∶1 的条件下,研究不同复合酶添加量(0.5%、1%、1.5%、2.0% 和 2.5%)对 SDF 得率的影响。

1.2.5.2 Plackett-Burman 试验 采用 Design-Expert 软件 Plackett-Burman 试验,对超声复合酶解过程中各个因子进行评价,以量化各因素对响应值的主效应,快速判断影响显著的因素[19]。建立 N=12 的试验,以麦麸 SDF 得率为响应值,对超声功率(A)、超声温度(B)、超声时间(C)、复合酶配比(D)、复合酶添加量(E)5 个因素进行考察,试验设计见表 1。

表 1 Plackett-Burman 设计因子水平及编码值

Table 1 Factor levels and coding values of Plackett-Burman design

编码水平	A超声功率(W)	B超声时间(min)	C超声温度(℃)	D复合酶配比	E复合酶添加量(%)
低(−1)	450	7	35	1∶2	1.5
高(+1)	630	11	45	2∶1	2.5

1.2.5.3 最陡爬坡试验 在 Plackett-Burman 试验的基础上,通过最陡爬坡试验对关键因素进行优化,快速确定其最优区域,减少试验次数和资源消耗,为后续响应面试验提供精准参数范围。最陡爬坡试验能够显著提高研究效率和模型准确性。

1.2.5.4 响应面试验 根据最陡爬坡试验结果分析,利用 Design-Expert 软件设计响应面试验,建立三因素三水平的试验模型,以麦麸 SDF 得率为响应值。试验设计见表 2。

表 2 响应面试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of response surface experiments

因素	编码水平		
	−1	0	1
A超声功率(W)	360	450	540
B超声温度(℃)	40	45	50
C复合酶添加量(%)	2.0	2.5	3

1.2.6 可溶性膳食纤维得率的测定 脱脂麦麸经过改性处理,离心、上清液浓缩醇沉后,冷冻干燥得到 SDF。SDF 得率计算公式如下式(1)所示。

$$\text{SDF得率}(\%) = \frac{\text{SDF质量}}{\text{脱脂麦麸质量}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.7 理化性质的测定

1.2.7.1 持水力 参考姜永超等[20]方法适当调整后,取 0.5 g 改性前后样品置于离心管中,加入 25 mL 蒸馏水,在恒温条件下振荡 1 h,随后以 4000 r/min 离心 20 min,倒出上清液后记录样品湿重。持水力按公式(2)计算。

$$持水力(g/g)=\frac{m_1-m}{m}$$　　式（2）

式中：m_1 为样品湿重，g；m 为样品干重，g。

1.2.7.2　持油力　参考 Li 等[21]方法适当调整后，取 0.5 g 改性前后样品置于离心管中与 10 mL 花生油混匀，静置 1 h。然后用 4000 r/min 离心 10 min，除去上面的花生油，称量沉淀。持油力按公式(3)计算。

$$持油力(g/g)=\frac{m_2-m}{m}$$　　式（3）

式中：m_2 为样品湿重，g；m 为样品干重，g。

1.2.7.3　膨胀力　参考袁梦等[22]方法适当调整后，取 0.5 g 改性前后样品置于量筒中，加入 8 mL 蒸馏水，静置吸水 24 h。膨胀力按公式(4)计算。

$$膨胀力(mL/g)=\frac{V_1-V}{m}$$　　式（4）

式中：V_1 为膨胀后体积，mL；V 为膨胀前体积，mL；m 为样品干重，g。

1.2.8　生物活性测定

1.2.8.1　体外益生活性的测定　参考 Wei 等[23]方法适当调整。将嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌分别从冻存管接种至液体 MRS 培养基，37 ℃ 厌氧条件下培养 24 h，再传代 2 次使菌种活化。将 1 mL 活化的嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌分别接种于无碳灭菌的 MRS 培养基中，并加入 1% 葡萄糖、菊粉或不同改性方法的膳食纤维作为唯一碳源，在 37 ℃ 厌氧条件下培养。以无碳培养基作为对照组。在培养 54 h 内每 6 h 采集一次菌液，测定 OD_{600} 值并绘制生长曲线。

1.2.8.2　益生菌黏附力测定　采用共沉淀法测定益生菌的黏附力[24]。用中性 PBS 缓冲液将嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌稀释至 10^7 cfu/mL。将 2 mL 菌悬液与 20 mg 膳食纤维样品混合，作为实验组。只含样品不含菌悬液的组作为对照组。仅含菌悬液的组作为空白组。分别在 37 ℃ 培养10 min，室温开始沉淀。从样品底部吸取 3 mL 溶液，分别于 20、40、60、80 min 在 540 nm 处测量吸光度。益生菌黏附力按公式(5)计算。

$$黏附力百分比(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100$$　　式（5）

式中：A_1 为含膳食纤维样品和菌悬液的实验组的吸收度；A_2 为只含膳食纤维样品不含菌悬液的对照组的吸收度；A_0 为只含菌悬液的空白组的吸收度。

1.3　数据处理

各组试验均作 3 次平行，试验结果用“均值±标准差”进行表示。采用 SPSS 26 软件进行显著性分析，$P<0.05$ 表示差异显著；利用 Design-Expert 13 中的 Plackett-Burman 和 Box-Behnken 方法进行模型建立与分析；使用 Origin 2022 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　高温蒸煮改性阶段的工艺优化

2.1.1　高温蒸煮温度对麦麸 SDF 得率的影响　由图 1A 可以看出，在蒸煮温度 110~120 ℃ 范围内，SDF 得率显著（$P<0.05$）增高且在高温蒸煮温度为 120 ℃ 时达到峰值，含量为 24.51%±0.49%。这一现象可能与膳食纤维中部分氢键断裂有关[25]。蒸煮温度在 120~125 ℃ 时，SDF 得率下降。这主要是由于蒸煮温度过高会破坏 SDF 的结构，使得乙醇沉淀困难，从而导致得率下降。随着蒸煮温度的增加，SDF 得率呈上升趋势后下降这一现象与季佳琪等[26]利用高温蒸煮法改性葡萄皮 SDF 的研究报道结果相似。在 125~130 ℃ 得率略有上升，这可能是因为 125 ℃ 时部分化学键的断裂可能导致 SDF 的进一步降解，从而降低了 SDF 得率。在 130 ℃ 时温度升高可能进一步促进了化学键的断裂，使得更多的膳食纤维成分得以释放，从而导致 SDF 得率再次上升[27]。实验结果表明，120 ℃ 时 SDF 得率显著高于 130 ℃（$P<0.05$）。基于安全性和能耗的考虑，选择 120 ℃ 作为最佳蒸煮温度。

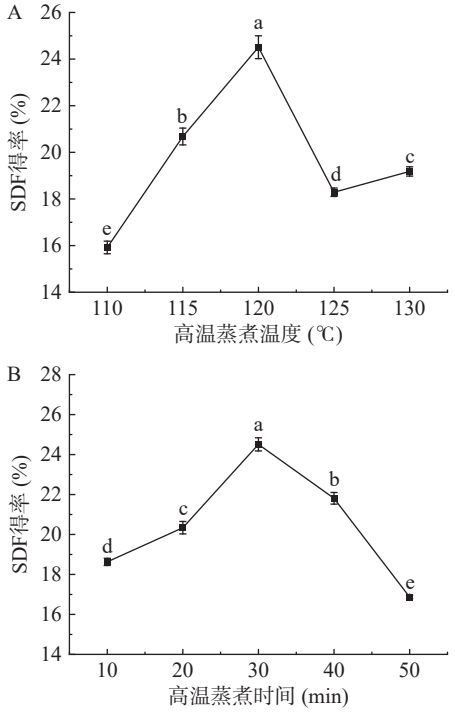


图 1　高温蒸煮条件对麦麸 SDF 得率的影响

Fig.1　Effect of high temperature steaming conditions on the SDF yield of wheat bran

注：不同小写字母表示差异性显著（$P<0.05$），图 2~图 3、图 6~图 7 同。

2.1.2　高温蒸煮时间对麦麸 SDF 得率的影响　由图 1B 可以看出，SDF 得率随高温蒸煮时间的增加而先增大后减小。在蒸煮时间 30 min 时 SDF 得率最高为 24.51%±0.33%。蒸煮时间超过 30 min 后，SDF 得率开始下降。这可能是由于短时间内高温蒸煮加速细胞结构打开，但长时间高温蒸煮会导致多糖链分子内作用减弱，进而破坏 SDF 结构[28]。张向辉等[29]在利用高温蒸煮改性绿豆皮膳食纤维的研究中也发现随着蒸煮时间的延长，其 SDF 得率先升高后降低。

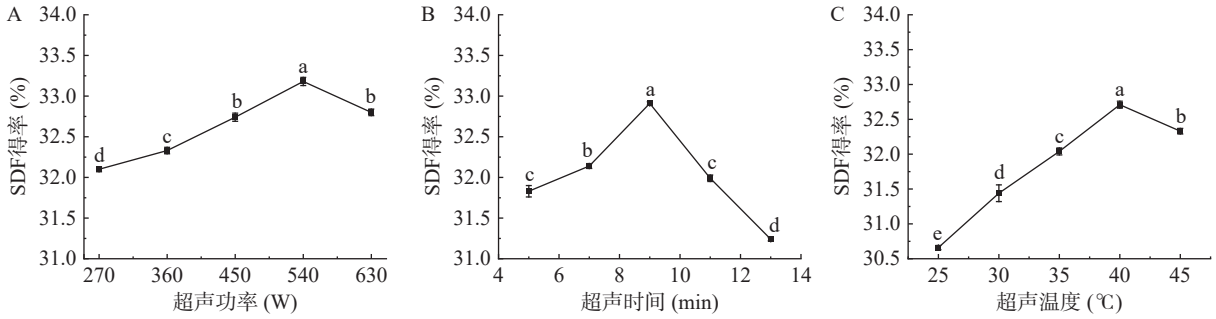


图 2 超声条件对麦麸 SDF 得率的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic conditions on the SDF yield of wheat bran

2.2 超声酶法改性阶段的工艺优化

2.2.1 单因素实验

2.2.1.1 超声功率对 SDF 得率影响 根据图 2A 可以看出，在超声功率从 270 W 提高到 540 W 后，SDF 得率从 32.10%±0.03% 增至 33.18%±0.05%，但超声功率超过 540 W 后 SDF 得率下降到 32.80%±0.04%。SDF 得率随超声功率的增大呈现先升高后降低的趋势，与卜智斌等[30] 在马蹄渣中提取膳食纤维的研究结果一致。这主要是因为超声的空化作用会破坏底物细胞结构，促使 IDF 中的化学键发生断裂，提高目标物质的溶出率[31]。但是，过高的超声强度会使溶出的组分进一步被分解成小分子，而不能被乙醇沉淀[32]。

2.2.1.2 超声时间对 SDF 得率影响 根据图 2B 可以看出，超声时间在 5~9 min 范围内时，SDF 得率呈上升趋势，在 9 min 时达到峰值 32.91%±0.02%。超声时间超过 9 min 后 SDF 得率显著下降（P<0.05）。这可能是超声时间较短时，麦麸 SDF 未能充分溶出；但超声时间过长会导致剪切作用等增大使分子分散、体系黏度增大，传质阻力增加[33]，从而降低 SDF 得率。这一趋势与张孟凡等[34] 的研究一致，其在红枣渣膳食纤维提取中也观察到随着超声时间增加，SDF 得率先升后降的现象。

2.2.1.3 超声温度对 SDF 得率影响 根据图 2C 可以看出，超声温度在 25~40 ℃ 范围内时，SDF 得率呈上升趋势，在 40 ℃ 时达到峰值 32.71%±0.05%。然而，当超声温度超过 40 ℃ 后，SDF 得率下降。这是因为适当的升高温度能加速粒子运动促进大分子的溶解进而提高得率；过高的温度可能会使分子结构破裂导致得率下降[35−36]。

2.2.1.4 复合酶配比对 SDF 得率影响 根据图 3A 可以看出，当纤维素酶与半纤维素酶的复合比例达到 1∶1 时，SDF 得率达到最大。纤维素酶能够破坏 β-(1,4)糖苷键，从而瓦解细胞壁结构，将 IDF 转化为 SDF；而半纤维素酶与纤维素酶协同作用，可分解细胞壁中的 β-葡聚糖等成分，适量使用可增强破壁效果[37]。随着半纤维素酶的数量增加，更多的半纤维素被转化为可溶性物质，这进一步提高了 SDF 得率；但是，当半纤维素酶的含量超出正常范围时，由于可溶性半纤维素分解成小分子低聚糖的速率已经超越了其生成的速率，这进一步导致 SDF 得率降低。

2.2.1.5 复合酶添加量对 SDF 得率影响 由图 3B 可以看出，随着复合酶添加量增加 SDF 得率先上升，从复合酶添加量为 0.5% 时 SDF 得率 30.33%±0.03% 逐步提升至复合酶添加量为 1.5% 时 SDF 得率 32.88%±0.05%，并在添加量为 2.0% 时达到峰值 33.13%±0.04%。SDF 得率提高可能是因为更多的酶与底物结合，使酶解反应更彻底，促进 SDF 的释放[38]。SDF 得率下降可能是因为酶过量导致 SDF 被过度水解[31]。

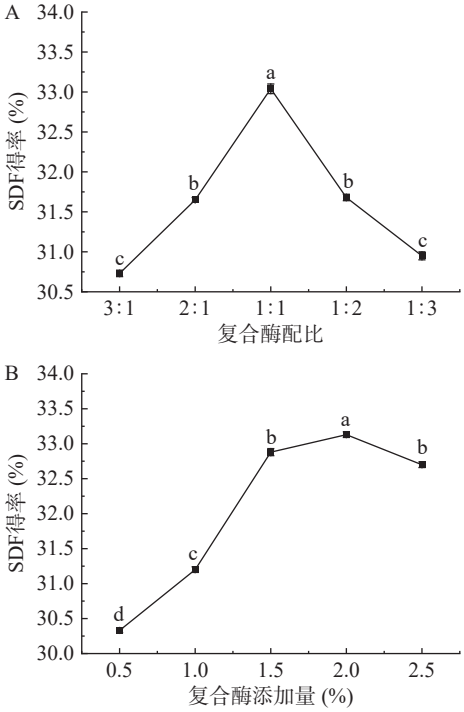


图 3 复合酶条件对麦麸 SDF 得率的影响

Fig.3 Effect of compound enzyme conditions on the SDF yield of wheat bran

2.2.2 Plackett-Burman 试验设计筛选结果 在超声复合酶法改性工艺优化研究中，本研究首先通过 Plackett-Burman 试验设计从超声功率、超声温度、超声时间、复合酶配比和复合酶添加量五个因素中筛选出三个关键因素。随后，利用最陡爬坡试验对这三个关键因素的最优范围进行优化，为后续响应面

试验提供精准区间，从而提升研究效率和模型准确性[39]。采用 Design-Expert 13 软件的 Lenth 法对表 3 中的 Plackett-Burman 试验结果进行分析[40]，得到因素标准化效应的半正态概率效应图和帕累托图（图 4），回归分析结果见表 4。

表 3　Plackett-Burman 试验设计与结果

Table 3　Plackett-Burman experimental design and results

实验号	A	B	C	D	E	SDF得率(%)
1	1	−1	1	−1	1	32.242
2	1	1	−1	−1	1	31.364
3	−1	1	1	−1	1	33.12
4	−1	−1	−1	1	1	32.34
5	1	1	−1	1	−1	29.364
6	−1	−1	−1	−1	−1	31.37
7	1	−1	−1	−1	−1	30.422
8	1	−1	1	1	1	32.178
9	1	1	1	1	−1	31.164
10	−1	−1	1	1	−1	32.014
11	−1	1	−1	1	1	31.754
12	−1	1	1	−1	−1	32.528

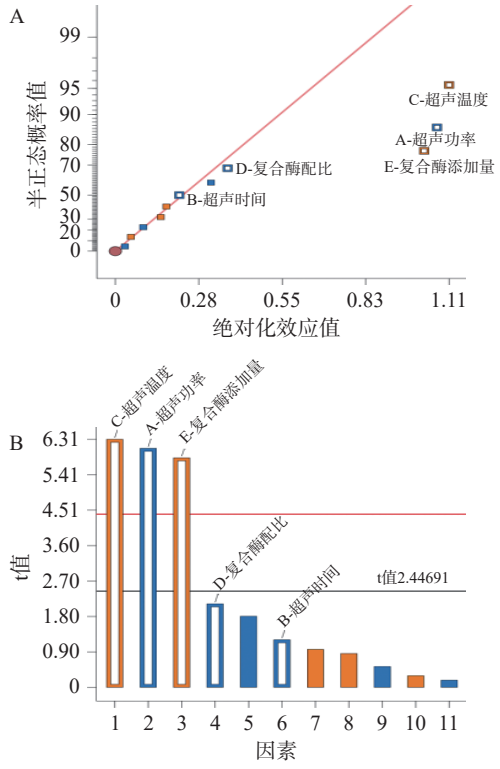


图 4　标准化效应的半正态概率效应图（A）和帕累托图（B）

Fig.4　Semi-normal probability effect diagram (A) and pareto chart (B) of standardized effect

注：红色代表正相关，蓝色代表负相关，空心代表单独因素产生的影响，实心代表两因素交互产生的影响。

如图 4A 所示，因素 A、C、E 的标准化效应点离拟合线较远，表明这些因素对结果具有显著影响（P<0.05）。图 4B 进一步证实，因素 A、C、E 的 t 值均超过显著性阈值，说明超声功率、超声温度和复合酶添加量是影响 SDF 得率的主要因素，而其他因素的影响较小。根据表 4 的数据，模型的 P 值为 0.0007（P<0.01），表明模型具有极高的显著性，能够准确拟合整个回归区域；决定系数 R^2 为 0.9511，表明模型与试验数据之间具有较高的相关性；校正决定系数 R^2_{adj} 为 0.9104，说明模型能够解释 91.04% 的试验数据变异性，表明试验结果具有较高的可靠性和精确性；精密度（Adeq Precision）达到 13.59，显著高于 4.0 的合理阈值，表明模型的信噪比处于理想水平。经由对相关数据开展多元回归拟合操作，进而得出回归方程 Y=31.68−0.5092A−0.0825B+0.5292C−0.1407D+0.5348E。

表 4　Plackett-Burman 的回归分析

Table 4　Regression analysis (ANOVA) of Plackett-Burman

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	得率	
					P值	显著性
模型	10.75	5	2.15	23.36	0.0007	**
A-超声功率	3.40	1	3.40	36.96	0.0009	**
B-超声时间	0.1348	1	0.1348	1.46	0.2718	
C-超声温度	3.67	1	3.67	39.79	0.0007	**
D-复合酶配比	0.4152	1	0.4152	4.51	0.0780	
E-复合酶添加量	3.14	1	3.14	34.06	0.0011	**
残差	0.5527	6	0.0921			
总和	11.31	11				

注：*表示结果差异显著（P<0.05），**表示结果差异极显著（P<0.01），表7同。

2.2.3　最陡爬坡试验　根据回归方程，因素 C 的偏回归系数为 0.5292，表明因素 C 和 E 对麦麸 SDF 得率具有正效应，即随着 C 和 E 的增加，SDF 得率呈上升趋势；而因素 A 表现为负效应。由于因素 C 的影响最为显著，因此以 C 为爬坡单位进行优化。

$$\text{A（超声功率）步长}=\frac{0.5092}{0.5292}\times\frac{630-450}{2}=86.6\ \text{W}$$

根据试验实际取为 90 W。

$$\text{C（超声温度）步长}=\frac{0.5292}{0.5292}\times\frac{45-35}{2}=5\ ℃$$

$$\text{E（复合酶添加量）步长}=\frac{0.5348}{0.5292}\times\frac{2.5-1.5}{2}=0.51\%$$

根据试验实际取为 0.5%。

根据试验设计的步长安排，试验结果如表 5 所示。在处理 2 中，SDF 得率达到最大值，因此将其作为响应面试验的中心点进行后续优化。

表 5　最陡爬坡试验设计及其结果

Table 5　Design of the steep climbing test and its results

处理	步长	超声功率（W）	超声温度（℃）	复合酶添加量（%）	SDF得率（%）
1	0	540	40	2.0	33.37
2	0+1Δ	450	45	2.5	34.26
3	0+2Δ	360	50	3	34.02
4	0+3Δ	270	55	3.5	33.55
5	0+4Δ	180	60	4	33.86
6	0+5Δ	90	65	4.5	32.97

注：Δ为一个步长单位。

2.2.4　Box-Behnken 响应面法试验　根据前期试验结果，本研究以超声功率、超声温度和复合酶添加量为自变量，SDF 得率为响应值，设计了三因素三水平的响应面优化试验，具体方案及试验结果见表 6。利

表 6 Box-Behnken 试验设计及其结果

Table 6 Box-Behnken design and response values

实验号	A超声功率	B超声温度	C复合酶添加量	SDF得率(%)
1	−1	−1	0	33.95
2	1	−1	0	34.00
3	−1	1	0	34.01
4	1	1	0	33.86
5	−1	0	−1	33.71
6	1	0	−1	33.88
7	−1	0	1	33.73
8	1	0	1	33.63
9	0	−1	−1	34.06
10	0	1	−1	33.87
11	0	−1	1	33.85
12	0	1	1	33.86
13	0	0	0	34.31
14	0	0	0	34.32
15	0	0	0	34.35
16	0	0	0	34.29
17	0	0	0	34.32

用 Design-Expert 13 软件对表 6 数据进行分析，拟合得到二次回归方程 $Y=34.32-0.0035A-0.0317B+0.0557C+0.0495AB-0.0675AC+0.0510BC-0.2680A^2-0.0945B^2-0.3125C^2$。

根据表 7 的方差分析结果，回归模型极显著

表 7 回归模型方差分析结果

Table 7 Analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.8923	9	0.0991	104.63	<0.0001	*
A-超声功率	0.0001	1	0.0001	0.1034	0.7572	
B-超声温度	0.0081	1	0.0081	8.51	0.0224	*
C-复合酶添加量	0.0249	1	0.0249	26.24	0.0014	**
AB	0.0098	1	0.0098	10.34	0.0147	*
AC	0.0182	1	0.0182	19.23	0.0032	**
BC	0.0104	1	0.0104	10.98	0.0129	*
A^2	0.3024	1	0.3024	319.15	<0.0001	**
B^2	0.0376	1	0.0376	39.68	0.0004	**
C^2	0.4112	1	0.4112	433.93	<0.0001	**
残差	0.0066	7	0.0009			
失拟项	0.0048	3	0.0016	3.37	0.1355	
CV(%)	0.3244		R^2_{adj}	0.9831		
Adeq Precisior	29.96		Pred R^2	0.9121		

(P<0.001)，且失拟项不显著(P>0.05)，表明模型拟合良好。模型的决定系数 R^2=0.9926，校正决定系数 R^2_{adj}=0.9831，说明模型能够解释 98.31% 的响应值变异性，适用于麦麸 SDF 得率的分析与预测。在因素分析中，一次项 B(超声温度)和 C(复合酶添加量)对 SDF 得率影响显著，而 A(超声功率)不显著；交互项 AB、AC、BC 及二次项 A^2、B^2、C^2 对响应值均表现出显著影响，表明各因素与响应值之间并非简单的线性关系。各因素的影响程度排序为：C>B>A，即复合酶添加量>超声温度>超声功率。如图 5 所示，与 AB、BC 相比，交互项 AC 对响应值影响的响应曲线变化更显著，说明复合酶添加量与超声功率的交互作用对 SDF 得率的影响更为突出，这与回归方程的方差分析结果一致。

2.2.5 超声复合酶法改性阶段工艺参数优化及验证

通过 Design-Expert 软件对模型进行优化分析，得到最佳工艺条件为超声功率 469.60 W、超声温度 41.76 ℃、复合酶添加量 2.72%，此时模型预测的麦麸 SDF 得率为 34.19%。结合实际操作条件，将工艺参数调整为超声功率 450 W、超声温度 45 ℃、复合酶添加量 2.5%，进行验证试验后测得麦麸 SDF 得率为 34.31%±0.08%。试验结果与模型预测值接近，表明该模型能够有效预测实际提取效果，可用于优化麦麸可溶性膳食纤维的提取工艺。

2.3 理化性质

持水能力、持油能力和膨胀力是膳食纤维的重要物理化学特性，也是评价膳食纤维功能性质主要指标之一[41]。较高的持水性和膨胀性能不仅可以有效避免食品脱水收缩，还能增强饱腹感，促进肠道蠕动，帮助加快粪便排出[42]。此外，优良的持油性能够增强食品的乳化稳定性，有效抑制脂肪的流出。由表 8 可知，改性后的 SDF 和 IDF 的持水力分别比未改性的高 1.75 倍和 1.15 倍；改性后的 SDF 和 IDF 的持油力分别比未改性的高 1.57 倍和 1.28 倍；改性后的 SDF 和 IDF 的膨胀力分别比未改性的高 1.36 倍和 1.09 倍。M-SDF 和 M-IDF 持水力、持油力以及膨胀力的提升，可能归因于改性处理增加了膳食纤维的孔隙度和表面张力，并扩大了其与水分子的接触面积[43]。

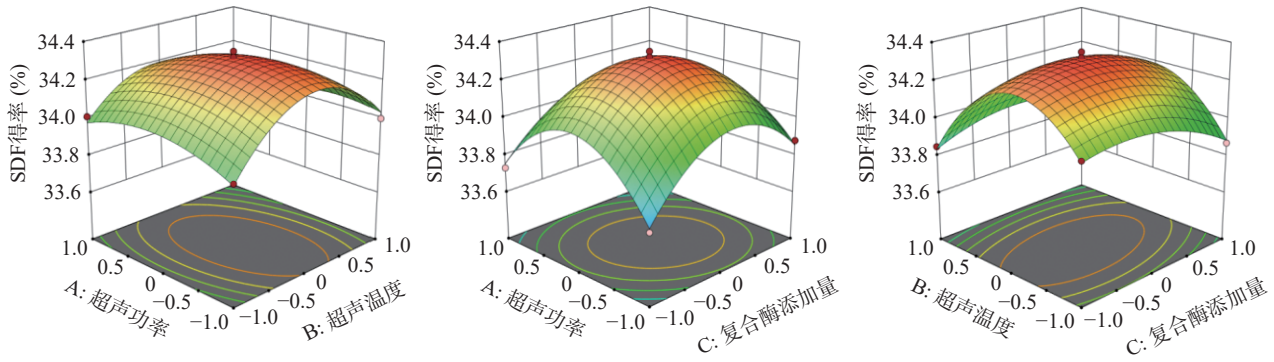


图 5 因素交互作用对 SDF 得率的影响

Fig.5 Effect of factor interaction on SDF yield

表 8　未改性与改性膳食纤维的持水力、持油力、膨胀力分析

Table 8　Water-holding capacity, oil-holding capacity and swelling capacity of unmodified and modified dietary fiber

样品	持水性(g/g)	持油性(g/g)	膨胀力(%)
U-SDF	1.19±0.10^{B}	1.81±0.11^{B}	6.17±0.38^{B}
M-SDF	2.38±0.15^{A}	2.84±0.15^{A}	8.39±0.23^{A}
U-IDF	5.05±0.09^{b}	3.30±0.10^{b}	2.56±0.06^{b}
M-IDF	5.81±0.07^{a}	4.24±0.05^{a}	2.78±004^{a}

注：样品中相同指标后面出现不同字母表示数据差异显著(P<0.05)，其中SDF的差异用大写字母表示，IDF的差异用小写字母表示。

这使得水分子能够更深入地渗透到纤维结构中，从而增强了持水力和膨胀力。同时，增大的孔隙度和比表面积为物理包油提供了更有利的条件，进而提升了持油能力[44]。

2.4　生物活性

2.4.1　体外益生活性分析　嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌是维持人体肠道健康的关键益生菌[45]。嗜酸乳杆菌能够附着于肠道上皮细胞表面，形成生物屏障，有效抑制有害菌的黏附和入侵。长双歧杆菌也具有黏附肠道上皮细胞的能力，可在肠道上皮细胞表面形成一层保护膜，增强肠道屏障功能[46]。本研究利用嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌在没有其他碳源的培养基中，测试改性与未改性膳食纤维作为碳源的能力，并比较了相同条件下葡萄糖或菊粉作为碳源时的生长曲线。由图 6A、图 6B 可见，随时间延长，嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的 OD600 值呈上升趋势，表明两种菌在体外培养条件下不断生长繁殖，菌液中菌株数量相应增加。在以葡萄糖为碳源的培养基中，这两种菌在 0~24 h 内快速繁殖。SDF 对嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的促生长作用较 IDF 更为显著(P<0.05)。SDF 因其良好的水溶性可在水中形成黏性溶液，更易被嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌接触利用；而 IDF 由于水溶性差，菌株难以直接分解，因而促增殖作用较弱。经改性处理的 M-IDF 相比未改性 U-IDF 显著提高了益生菌利用率(P<0.05)，这一结果与尹立晨等[47] 关于改性豆渣膳食纤维促进嗜酸乳杆菌和乳双歧杆菌增殖的研究一致。这可能是由于改性过程中产生的热效应与空化作用破坏了纤维结晶区，暴露出更多活性位点，从而为益生菌代谢提供了更多结合位点[48]。

2.4.2　益生菌黏附力分析　细菌在基质表面的黏附对其增殖过程具有重要影响[49]。本研究分析了膳食纤维样品随着时间延长对嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的黏附力影响。由图 7A、图 7B 可知，未改性与改性后的膳食纤维对嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的黏附力总体呈现先增加后略有下降的趋势。改性后 SDF 在黏附时间为 60 min 时对嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的最大黏附率可达 65.1%±0.5% 和 65.3%±0.6%。SDF 对嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的黏附力高于 IDF。这可能是由于 SDF 具有较好的水溶性，能在溶液中形成较为疏松的网络结构，这种结构为益生菌提供了更多的附着位点。M-IDF 对嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的黏附力高于 U-IDF，这一结果与 Jiang 等[11] 采用超声-微波协同改性玉米皮 IDF 的研究结论一致，均表明改性处理能有效提升膳食纤维对益生菌的黏附能力，这可能是与 M-IDF 经过改性处理暴露了一些与 IDF 黏附相关的蛋白质[50]。实验结果表

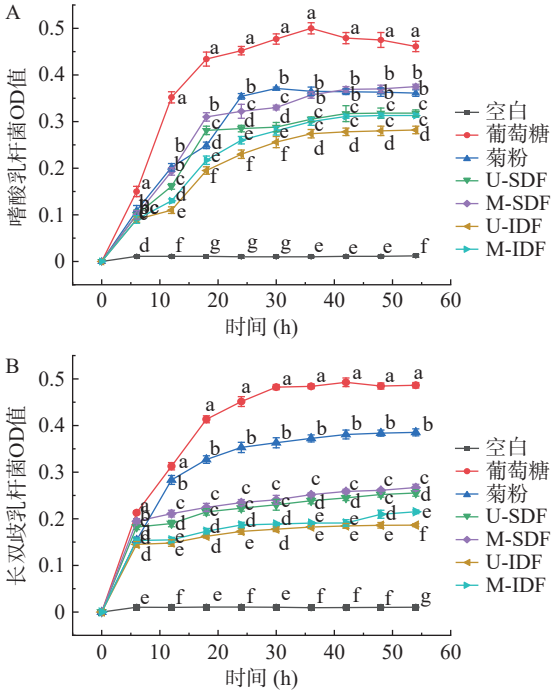


图 6　嗜酸乳杆菌(A)和长双歧杆菌(B)生长曲线

Fig.6　Growth curves of *Lactobacillus acidophilus* (A) and *Bifidobacterium longum* (B)

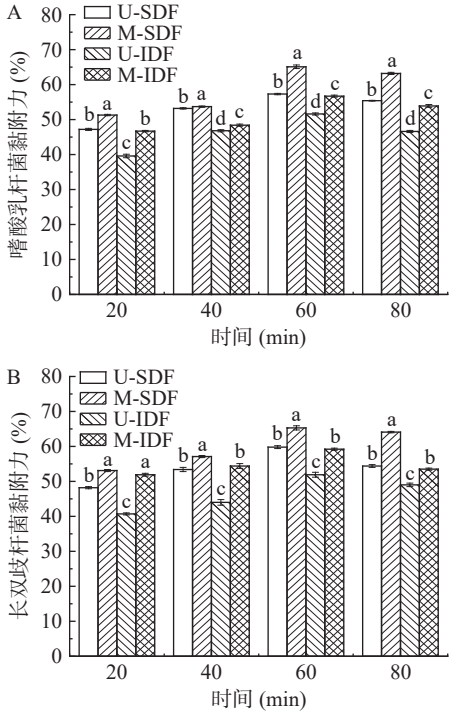


图 7　嗜酸乳杆菌(A)和长双歧杆菌(B)黏附力

Fig.7　Adhesion force diagrams of *Lactobacillus acidophilus* (A) and *Bifidobacterium longum* (B)

明，高温联合超声复合酶解改性能有效提升膳食纤维的益生菌黏附力。这一改性方式可能改变了膳食纤维的结构与表面性质，使其表面更利于益生菌附着，为后续开发具有更高益生菌承载能力的膳食纤维产品提供了理论依据，有助于优化膳食纤维在食品、保健品等领域的应用。

3 结论

本研究通过单因素实验、Plackett-Burman 试验及 Box-Behnken 试验设计，优化了高温蒸煮联合超声复合酶法改性麦麸膳食纤维的工艺条件。最佳工艺参数为：料液比 1∶10 g/mL，高温蒸煮温度 120 ℃、时间 30 min，超声功率 450 W、时间 9 min、温度 45 ℃，复合酶配比 1∶1，复合酶添加量 2.5%(w/w)。在此条件下，麦麸 SDF 得率提升至 34.31%±0.08%。改性后的麦麸 SDF 和 IDF 在持水力、持油力和膨胀力方面均显著优于未改性样品，同时显著增强了嗜酸乳杆菌和长双歧杆菌的生长促进能力及黏附能力。结果表明，高温蒸煮联合超声复合酶法是一种高效提升 SDF 得率并显著改善 SDF 和 IDF 功能特性的改性方法，为麦麸膳食纤维作为益生元在健康食品中的应用提供了理论支持。

© 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] KANG Ji, YIN Sijia, LIU Jie, et al. Fermentation models of dietary fibre *in vitro* and *in vivo* - A review[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107685.

[2] WANG Heng, WANG Mengyu, ZENG Jie, et al. Effect of physical treatments on the functional and structural features of soluble dietary fiber from soybean dregs[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(3): 1777−1783.

[3] CHENG Wen, SUN Yujie, FAN Mingcong, et al. Wheat bran, as the resource of dietary fiber: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(26): 7269−7281.

[4] DIVATE R D, WANG C C, CHOU S T, et al. Using wheat bran and soybean meal as solid state fermentation substances for the production of *Xylaria nigripes* with bioactivities[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 70: 127−133.

[5] FERRI M, HAPPEL A, ZANAROLI G, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran[J]. New Biotechnology, 2020, 56: 38−45.

[6] 刘学成, 王文亮, 弓志青, 等. 金针菇膳食纤维改性、理化性质及抗氧化、降血脂活性[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 90−98. [LIU X C, WANG W L, GONG Z Q, et al. Modification, physicochemical properties, and antioxidant and hypolipidemic activities of dietary fiber from *Flammulina velutipes*[J]. Food Science, 2021, 42(23): 90−98.]

[7] 田玉荣, 孙元琳. 小麦麸皮膳食纤维改性技术研究进展[J]. 食品工程, 2022(2): 4−7,60. [TIAN Y R, SUN Y L. Research progress on modification technology of wheat bran dietary fiber[J]. Food Engineering, 2022(2): 4−7,60.]

[8] 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 Z Y, LIU Y X Y, YAO Y Y, et al. Utilization and modification status of nutrients in wheat bran[J]. Cereals and Oils, 2020, 33(12): 18−20.]

[9] GAN Jiapan, XIE Liang, PENG Guanyi, et al. Systematic review on modification methods of dietary fiber[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106872.

[10] HUANG Hairong, CHEN Jiajun, CHEN Yi, et al. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymatic method: Structural, physicochemical and functional properties[J]. LWT, 2021, 145: 111314.

[11] JIANG Caixia, ZENG Xiangrui, WEI Xuyao, et al. Improvement of the functional properties of insoluble dietary fiber from corn bran by ultrasonic-microwave synergistic modification[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 104: 106817.

[12] 巫永华, 刘梦虎, 孙悦, 等. 超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维及理化特性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 8−14. [WU Y H, LIU M H, SUN Y, et al. Analysis of ultrasonic microwave-assisted enzymatic extraction of water-soluble dietary fiber from black bean skin and its physicochemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 8−14.]

[13] 谢翎, 陈红梅, 杨吉彬, 等. 豆渣高温改性结合超声辅助酶解生产水溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 268−271,275. [XIE L, CHEN H M, YANG J B, et al. Study on the production of water-soluble dietary fiber from soybean residue by high-temperature modification combined with ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 268−271,275.]

[14] 游艳芝, 苏萃扬, 张亮, 等. 膳食纤维不同改性技术研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 406−416. [YOU Y Z, SU C Y, ZHANG L, et al. Research progress on different modification technologies of dietary fiber[J]. Food Science, 2025, 46(13): 406−416.]

[15] 雷梦续. 麦麸膳食纤维对面条品质影响规律的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021. [LEI M X. Study on the influence law of wheat bran dietary fiber on noodle quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.]

[16] 张媛媛, 宣丽, 吕美, 等. 双酶法提取小麦麸皮膳食纤维的工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(4): 36−40. [ZHANG Y Y, XUAN L, LV M, et al. Research on the process of extracting dietary fiber from wheat bran by double enzyme method[J]. Cereals and Food Industry, 2019, 26(4): 36−40.]

[17] 孙静, 邵佩兰, 徐明, 等. 高温蒸煮结合酶解改性枣渣膳食纤维[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 137−142. [SUN J, SHAO P L, XU M, et al. Modification of jujube residue dietary fiber by high-temperature cooking combined with enzymatic hydrolysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 137−142.]

[18] 赵匀淑, 程静, 卢子博, 等. 大蒜秸秆可溶性膳食纤维的超声复合酶解提取及其抗氧化性分析[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(6): 117−120,127. [ZHAO Y S, CHENG J, LU Z B, et al. Extraction of soluble dietary fiber from garlic straw by ultrasonic complex enzymatic hydrolysis and its antioxidant activity analysis[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(6): 117−120,127.]

[19] 刘梓涵, 张永根, 孙丽华. 湿玉米蛋白粉和赖氨酸渣混合物固态发酵条件优化及营养价值评定[J]. 饲料工业, 2025, 46(3): 87−95. [LIU Z H, ZHANG Y G, SUN L H. Optimization of solid-state fermentation conditions and nutritional value evaluation of wet corn gluten meal and lysine residue mixture[J]. Feed Industry, 2025, 46(3): 87−95.]

[20] 姜永超, 林丽静, 龚霄, 等. 物理改性处理对菠萝皮渣膳食纤

维物化特性的影响[J]. 热带作物学报，2019, 40(5)：973−979. [JIANG Y C, LIN L J, GONG X, et al. Influence of physical modification treatment on physicochemical properties of dietary fiber from pineapple peel residue[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(5)：973−979.]
[21] 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.
[22] 袁梦, 刘晓倩, 张浩, 等. 芡实膳食纤维的结构、理化和功能特性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17)：151−161. [YUAN M, LIU X Q, ZHANG H, et al. Structure, physicochemical and functional properties of dietary fiber from euryale ferox salisb[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17)：151−161.]
[23] WEI Xuyao, JIANG Caixia, LIU Xiaolan, et al. Effect of *γ*-irradiation combined with enzymatic modification on the physicochemical properties of defatted rice bran dietary fiber[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101975.
[24] FERNANDO W M A D B, FLINT S, BRENNAN C S, et al. The influence of environmental factors on the adhesion of combinations of probiotics to rice fibre fractions[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(6)：2293−2302.
[25] 黄泽威. 物理改性百香果皮膳食纤维及咀嚼片的制备[D]. 成都：成都大学, 2024. [HUANG Z W. Physical modification of dietary fiber from passion fruit peel and preparation of chewable tablets[D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.]
[26] 季佳琪, 李明初, 李冬霞, 等. 高温蒸煮结合蜗牛酶法改性葡萄皮不溶性膳食纤维工艺优化及体外降血糖作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16)：249−258. [JI J Q, LI M C, LI D X, et al. Process optimization and *in vitro* hypoglycemic effect of insoluble dietary fiber from grape skin modified by high-temperature cooking combined with snail enzyme method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16)：249−258.]
[27] 周丽珍, 刘冬, 李艳, 等. 高温蒸煮结合酶解改性豆渣膳食纤维[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(1)：27−30. [ZHOU L Z, LIU D, LI Y, et al. Modification of dietary fiber from soybean residue by high-temperature cooking combined with enzymatic hydrolysis[J]. Food Research and Development, 2011, 32(1)：27−30.]
[28] 李丹, 汪秀妹, 梁杰, 等. 高温蒸煮结合超声酶法改性菠萝蜜籽膳食纤维工艺优化及结构表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23)：203−212. [LI D, WANG X M, LIANG J, et al. Optimization of the process and structural characterization of jackfruit seed dietary fiber modified by high-temperature cooking combined with ultrasonic enzymatic method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23)：203−212.]
[29] 张向辉, 罗磊, 段雪莹, 等. 高温蒸煮-复合酶法制备绿豆皮可溶性膳食纤维及体外降血糖作用研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12)：59−66. [ZHANG X H, LUO L, DUAN X Y, et al. Preparation of soluble dietary fiber from mung bean skin by high - temperature cooking - composite enzyme method and its *in vitro* hypoglycemic effect[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12)：59−66.]
[30] 卜智斌, 曾劲, 禹淞文, 等. 超声辅助复合酶法提取马蹄渣不溶性膳食纤维工艺优化及品质对比[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7)：177−183. [BU Z B, ZENG J, YU S W, et al. Optimization of the process for extracting insoluble dietary fiber from water chestnut residue by ultrasonic-assisted composite enzyme method and quality comparison[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7)：177−183.]
[31] 张智, 宋伟, 闫建英, 等. 油茶粕膳食纤维的超声辅助酶法提取工艺优化及理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18)：162−169. [ZHANG Z, SONG W, YAN J Y, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction process and analysis of physicochemical properties of dietary fiber from camellia oleifera meal[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18)：162−169.]
[32] BASHIR S, AHMAD A, ABBASI K S, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of insoluble dietary fiber from wheat bran and its characterization[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(4).
[33] 杨宗玲, 李晗, 范方宇, 等. 超声辅助酶法提取无籽刺梨果渣中黄酮的工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(13)：184−192. [YANG Z L, LI H, FAN F Y, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of flavonoids from *Rosa sterilis* pomace and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13)：184−192.]
[34] 张孟凡, 岳丽, 敬思群, 等. 超声辅助-酶解协同作用提取红枣渣膳食纤维及其促消化作用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7)：205−212. [ZHANG M F, YUE L, JING S Q, et al. Extraction of dietary fiber from jujube residue by ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis and its promoting digestion effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(7)：205−212.]
[35] 郭京京, 李雅轩, 樊子怡, 等. 响应面优化沙棘果渣膳食纤维提取工艺及应用性质评价[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(7)：1181−1188. [GUO J J, LI Y X, FAN Z Y, et al. Optimization of dietary diber extraction process from seabuckthorn pomace by response surface methodology and evaluation of its application properties[J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(7)：1181−1188.]
[36] 胡金祥, 许程剑, 闫妮娜, 等. 松茸渣不溶性膳食纤维提取及特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2)：359−365. [HU J X, XU C J, YAN N N, et al. Study on extraction and characteristics of insoluble dietary fiber from *Tricholoma matsutake* residue[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(2)：359−365.]
[37] 李月华, 张思耀, 赖谱富, 等. 复合酶法制取笋头水溶性膳食纤维的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(10)：269−271,275. [LI Y H, ZHANG S Y, LAI P F, et al. Study on the preparation of water-soluble dietary fiber from bamboo shoot tips by composite enzyme method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(10)：269−271,275.]
[38] 魏依华. 绿豆皮不溶性膳食纤维的改性及降血脂的研究[D]. 长春：吉林农业大学, 2023. [WEI Y H. Research on modification and hypolipidemic effect of insoluble dietary fiber from mung bean skin[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.]
[39] 葛松涛, 寿泉洪, 韩文凤, 等. 响应面法优化酸溶蛋白发酵工艺[J]. 饲料工业, 2023, 44(13)：14−20. [GE S T, SHOU Q H, HAN W F, et al. Optimization of acid-soluble protein fermentation process by response surface methodology[J]. Feed Industry, 2023, 44(13)：14−20.]
[40] 张辉, 张娜娜, 马丽, 等. 响应面法优化大麦苗叶绿素提取工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(2)：75−80. [ZHANG H, ZHANG N N, MA L, et al. Optimization of extraction process for chlorophyll from young barley grasses by response surface methodology[J]. Food Science, 2014, 35(2)：75−80.]
[41] 吴晓涵, 罗跃腾, 刘梦, 等. 莴苣叶中不溶性膳食纤维的提取工艺及其表征[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(11)：170−177. [WU X H, LUO Y T, LIU M, et al. Extraction process and characterization of insoluble dietary fiber from lettuce leaves[J]. Food Re-

search and Development, 2024, 45(11): 170−177.]
[42] 彭月. 超声辅助酶法提取姜渣中不溶性膳食纤维及高膳食纤维饼干的工艺研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024. [PENG Y. Study on the extraction of insoluble dietary fiber from ginger residue by ultrasound-assisted enzymatic method and the process of high dietary fiber biscuits[D]. Yantai: Yantai University, 2024.]
[43] ZHANG Yanpeng, WANG Bin, ZHANG Weinong, et al. Effects and mechanism of dilute acid soaking with ultrasound pretreatment on rice bran protein extraction[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 318−324.
[44] 李晗, 杨宗玲, 毕永雪, 等. 超声辅助酶法提取西番莲果皮可溶性膳食纤维及理化性质[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 161−165,172. [LI H, YANG Z L, BI Y X, et al. Ultrasonic-assisted enzymatic extraction and physicochemical properties of soluble dietary fiber from passion fruit peel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 161−165,172.]
[45] 赵军英, 张明辉, 刘彦品, 等. 中国母乳组学队列研究与产业化应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 502−513. [ZHAO J Y, ZHANG M H, LIU Y P, et al. Cohort study and industrial application of human milk omics in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 502−513.]
[46] 赖彬彬, 金许芳. 双歧杆菌三联活菌辅助治疗新生儿高胆红素血症的临床效果[J]. 临床合理用药, 2025, 18(4): 122−125. [LAI B B, JIN X F. Clinical efficacy of *Bifidobacterium triple viable* in the adjuvant treatment of neonatal hyperbilirubinemia[J]. Clinical Rational Drug Use, 2025, 18(4): 122−125.]
[47] 尹立晨, 童群义. 改性豆渣膳食纤维的理化性质、结构及其益生活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 141−148. [YIN L C, TONG Q Y. Study on physicochemical properties, structure and probiotic activity of modified okara dietary fiber[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 141−148.]
[48] 吕秀莉, 岳莹雪, 平丽筠, 等. 益生菌黏附机制及其拮抗肠道致病菌研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 313−320. [LÜ X L, YUE Y X, PING L J, et al. Research progress on adhesion mechanisms of probiotics and their antagonism against intestinal pathogenic bacteria[J]. Food Science, 2023, 44(9): 313−320.]
[49] 唐菡颀, 朱红广, 仇菊, 等. 粒径对燕麦麸皮结构、物理特性及体外益生菌黏附力的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 25−33. [TANG H Q, ZHU H G, QIU J, et al. Influence of particle size on the structure, physical properties and *in vitro* probiotic adhesion of oat bran[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 25−33.]
[50] LI Li, ZHAO Yafan, LI Jiaqi, et al. The adhesion of the gut microbiota to insoluble dietary fiber from soy hulls promoted the proliferation of probiotics *in vitro*[J]. LWT, 2022, 153: 112560.