骆扬, 顾慧琼, 熊高, 等. 混菌发酵对三七花渣膳食纤维结构和功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 280−290. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060351

LUO Yang, GU Huiqiong, XIONG Gao, et al. Effects of Mixed Fermentation on Structure and Functional Properties of Dietary Fiber from *Panax notoginseng* Flower Residue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 280−290. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060351

· 工艺技术 ·

混菌发酵对三七花渣膳食纤维结构和功能特性的影响

骆　扬[1], 顾慧琼[1], 熊　高[1], 詹云静[1], 齐宁利[2], 龚　霄[3,*]

（1.文山学院三七医药学院, 云南文山 663099;
2.中国热带农业科学院农产品加工研究所, 广东湛江 524001;
3.岭南师范学院食品科学与工程学院, 广东湛江 524048）

摘　要: 本研究采用雪莲菌（Kefir grains）与红茶菌（Kombucha）混合发酵对三七花渣膳食纤维进行改性，探究混菌发酵工艺参数对其可溶性膳食纤维（SDF）和不可溶性膳食纤维（IDF）功能特性的影响。通过单因素及响应面法优化试验，以发酵后 SDF（F-SDF）得率为指标，确定最佳发酵条件为：雪莲菌与红茶菌发酵液比例 2∶1 (v/v)、接种量 8% (v/w)、发酵时间 53 h、发酵温度 28 ℃。在此条件下，三七花渣 F-SDF 得率 40.32%，且其官能团数量显著增加。发酵显著提升了膳食纤维的功能特性，F-SDF 和 F-IDF 的持水力（WHC）分别提高 80.30% 和 89.77%，持油力（OHC）分别提高 69.37% 和 76.77%，吸水溶胀力（WSC）分别提高 111.98% 和 67.18%，阳离子交换能力（CEC）分别提高 58.82% 和 122.22%，葡萄糖的吸附能力分别提高 61.18% 和 72.66%，胆酸钠吸附能力分别提高 22.50% 和 22.61%。在模拟胃肠环境下，pH2.0 条件下胆固醇吸附能力分别提高 24.77% 和 20.65%，亚硝酸盐吸附能力分别提高 21.48% 和 19.28%，pH7.0 条件下胆固醇吸附能力分别提高 22.67% 和 29.45%、亚硝酸盐吸附能力分别提高 19.27% 和 24.90%。总之，混菌发酵有效改变了三七花渣膳食纤维的物理结构和功能特性，为推动三七副产物的高值化应用提供了理论依据。

关键词: 混菌发酵, 三七花渣, 膳食纤维, 结构, 功能特性

中图分类号: TS210.9　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0280−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060351

本文网刊:

Effects of Mixed Fermentation on Structure and Functional Properties of Dietary Fiber from *Panax notoginseng* Flower Residue

LUO Yang[1], GU Huiqiong[1], XIONG Gao[1], ZHAN Yunjing[1], QI Ningli[2], GONG Xiao[3,*]

（1.College of Notoginseng Medicine and Pharmacy, Wenshan University, Wenshan 663099, China;
2.Agricultural Products Processing Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524001, China;
3.College of Food Science and Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China）

Abstract: In this work, the *Panax notoginseng* flower residue was mixed fermented with the kefir grains and kombucha consortium to investigate the effects of fermentation parameters on the functional properties of the soluble dietary fiber (SDF) and insoluble dietary fiber (IDF) by single-factor and response surface experiments. The optimal fermentation conditions were as follows: the broth ratio of kefir grains and kombucha 2∶1 (v/v), inoculation amount 8% (v/w), culture temper-

收稿日期: 2025−06−29

基金项目: 国家级大学生创新训练项目（202411556003）; 文山州技术创新人才项目（KJJSCX-2021001）。

作者简介: 骆扬（1982−）, 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 40020889@qq.com。

*** 通信作者:** 龚霄（1984−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品发酵与酶工程, E-mail: gongxiaocau@126.com。

ature was 28 ℃, and fermentation time 53 h. Under these optimized conditions, the fermented SDF (F-SDF) yield was 40.32%, and its functional group abundance had been significantly enhanced. For F-SDF and F-IDF, the water holding capacity (WHC), oil holding capacity (OHC), water swelling capacity (WSC), and cation exchange capacity (CEC) increased by 80.30% and 89.77%, 69.37% and 76.77%, 111.98% and 67.18%, and 58.82% and 122.22%, respectively. The adsorption capacities of glucose and sodium cholate increased by 61.18% and 72.66%, 22.50% and 22.61%, respectively. Under simulated gastrointestinal conditions, when the pH was 2.0, the adsorption capacities of cholesterol and nitrite were significantly increased by 24.77% and 20.65%, 21.48% and 19.28%; when the pH was 7.0, the adsorption capacities of cholesterol and nitrite were significantly increased by 22.67% and 29.45%, 19.27% and 24.90%, respectively. In conclusion, the mixed fermentation effectively modified the physical structure and functional properties of the dietary fiber derived from notoginseng flower residue. The results provide a theoretical basis for promoting the high-value application of notoginseng by-products.

Key words: mixed fermentation; *Panax notoginseng* flower residue; dietary fiber; structure; functional properties

三七(*Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen ex C. Chow)为五加科人参属草本植物，主产于中国云南、广西等地区，其主产区云南文山州的种植面积超过 12 万亩。2017 年，三七地上部分(包括花)已被纳入药食同源目录。三七花年产量近 500 吨，除皂苷外，还含有粗纤维(10.18%)、总糖(18.96%)、蛋白质(21.91%)、脂肪(0.84%)等组分[1]，在制药工业中，三七花通常用于提取皂苷，而三七花渣被废弃[2]。膳食纤维(Dietary Fiber, DF)是一类难以被人体小肠消化吸收的碳水化合物，主要在大肠内经微生物发酵降解。研究表明，DF 在调节血糖、血脂以及促进肠道蠕动等方面具有重要作用，根据溶解性差异，分为可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)，二者在调控血糖、维持肠道菌群稳态及调节免疫应答等生理过程中具有协同互补效应[3]。通过微生物发酵改性技术，提升三七花渣中 DF(尤其是 SDF)的得率及其功能特性，探索其高值化利用途径，以期解决资源浪费问题，并拓展药食同源副产物的应用价值。

雪莲菌(Kefir grains)俗称藏灵菇、开菲尔粒，其粒径大小在 3~35 mm 之间，呈花椰菜状的不规则乳白色颗粒，是由乳酸菌、醋酸菌和酵母菌组成的微生物混合体，其发酵过程中会产生纤维素酶，从而分解不溶性膳食纤维，不仅改变了 DF 的物理化学性质，还显著提高了其功能特性[4−5]。红茶菌(Kombucha)是由醋酸菌、酵母菌及少量乳酸菌组成的一类复合菌群，其发酵液是指通过用红茶菌发酵含糖茶水后得到的微生态液体，富含茶黄素、茶红素、醋酸、葡萄糖酸等成分，具有多种保健功能[6−7]。红茶菌发酵还能产生细菌纤维素，通过其代谢产物对其他纤维进行改性，改善其持水性、持油性和抗氧化性[8−10]，使其在食品、医药和环保等领域具有更广泛的应用。

相较于单一菌种发酵，混菌发酵通常能更有效地克服单一菌种的局限性，使 IDF 逐渐向 SDF 转化，实现更全面的纤维组分降解和结构改变，从而提升纤维的利用价值。研究表明，经菌种发酵改性后纤维的粒径变小、比表面积增加、持水、持油、膨胀性等指标都有提升，可应用于低 GI、低脂等功能性食品的开发，提升副产品的价值[11−13]。混合发酵结合了不同微生物的优势，雪莲菌在发酵过程中能够产生半纤维素酶、纤维素酶等多种酶类，能够有效降解多糖类大分子物质，使其转化为更易被人体吸收的低分子功能性成分，红茶菌发酵过程中产生的有机酸、氨基酸等代谢产物，可以改善 DF 的理化性质，从而进一步改善纤维的结构和功能特性[14−15]。本文通过雪莲菌和红茶菌混合发酵探究其对三七花渣中 DF 结构和功能特性的影响，分析发酵处理前后渣中膳食纤维(SDF 和 IDF)的结构变化以及持水力、膨胀力、吸附胆固醇能力等功能特性的改变，以期为三七地上部分药食同源资源的高值化利用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

三七花　购于文山三七国际交易市场；雪莲菌　西藏天林生物有限公司；红茶菌　南京红茶菌实业有限公司；脱脂乳　内蒙古伊利实业有限公司；大豆油　九三食品股份有限公司；α-淀粉酶 (1000 IU)　北京鸿润宝顺科技有限公司；冰乙酸　成都市科隆化学品有限公司；磷酸　广东惠普化工科技有限公司；邻苯二甲醛　上海士峰生物科技有限公司；浓盐酸　广东鑫诚远科技有限公司；溴化钾、无水对氨基苯磺酸　天津市大茂化学试剂厂；胆酸钠　西亚试剂；以上试剂均为分析纯。

LDZX-50KBS 立式高压蒸汽灭菌器　上海申安医疗器械厂；80-1 低速台式离心机　常州金坛大地自动化仪器厂；HH-S2S 恒温水浴锅　金坛市大地自动化仪器厂；V-5100 分光光度计　上海元析仪器有限公司；VERTEX 70v 傅里叶变换红外光谱仪　上海尔迪仪器科技有限公司；LRH-250F 生化培养箱　上海一恒科学仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　雪莲菌、红茶菌发酵液制备　将脱脂乳高压灭菌处理冷却后，接入 10% 的雪莲菌，在 28 ℃ 条件下恒温培养，每日定期更换脱脂乳，取第 3 d 的发酵乳，备用[15]。

称取相当于水质量 0.5% 的红茶，用沸水浸提

15 min 制备茶汤，加入茶汤质量 10% 的蔗糖，冷却后接入 8% 的红茶菌液室温放置，pH3.0 时为发酵终点[16]。

1.2.2 发酵液菌落总数测定及混合菌株拮抗实验 参照于亭等[17] 的方法。分别量取雪莲菌发酵液和红茶菌发酵液各 1 mL，采用 10 倍浓度梯度稀释法制备 10^{-3}、10^{-4}、10^{-5} 梯度菌悬液，取 0.1 mL 均匀涂布于 MRS 平板，30 ℃ 恒温培养 48~72 h。

参照胡羚等[18] 所述方法，将培养好的两种菌株在平板上划线，观察两菌株交叉点上是否产生抑菌圈，若未出现则表明 2 个菌株间无拮抗作用。

1.2.3 三七花渣膳食纤维的制备 参照《中国药典》2020 版中三七皂苷的提取方法提取皂苷后收集三七花渣，以雪莲菌和红茶菌共同对三七花渣进行发酵处理，将未发酵和发酵的三七花渣在 40 ℃ 下干燥至恒重，研磨过 80 目筛后称取 5.0 g，按料液比 1∶20 加入去离子水，用磷酸盐缓冲液（6 mol/L）调 pH 至 5.4。添加 1% 的 α-淀粉酶，于 85 ℃ 水浴 30 min，然后加入 7% NaOH 溶液 10 mL，搅拌静置 30 min 后在 4000 r/min 下离心 15 min，得上清液和沉淀物。沉淀物用蒸馏水洗至中性后再用 95% 乙醇洗涤，烘干后制得未发酵三七花渣不溶性膳食纤维（A-IDF）和发酵三七花渣不溶性膳食纤维（F-IDF）。上清液中加入 4 倍体积的 95% 乙醇，室温静置 2 h，收集沉淀并用 95% 乙醇清洗，40 ℃ 干燥至恒重，制得未发酵三七花渣可溶性膳食纤维（A-SDF）和发酵三七花渣可溶性膳食纤维（F-SDF）。

1.2.4 单因素实验 取三七花渣 15.0 g、蒸馏水 75 mL，在雪莲菌与红茶菌发酵液比例（1∶0、0∶1、3∶1、2∶1、1∶1、1∶2、1∶3）、菌接种量（2%、4%、6%、8%、10%）、发酵温度（24、26、28、30、32 ℃）、发酵时间（36、42、48、54、60 h）条件下，以 F-SDF 得率为指标，确定三七花渣 DF 的混菌发酵工艺条件。考察单一因素时，其余因素固定为：雪莲菌与红茶菌发酵液比例 2∶1、菌接种量 8%、发酵温度 26 ℃、发酵时间 54 h。

1.2.5 响应面试验设计 基于单因素实验结果，运用 Box-Behnken 试验设计原理，选取雪莲菌与红茶菌发酵液比例（A）、菌接种量（B）、发酵时间（C）、发酵温度（D）作为自变量，以 F-SDF 得率作为评价指标，构建响应曲面模型进行工艺优化，响应面因素水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 响应面试验因素水平

Table 1 Box-Behnken response surface test factors and levels

水平	因素			
	A雪莲菌与红茶菌发酵液比例	B菌接种量（%）	C发酵时间（h）	D发酵温度（℃）
−1	3∶1	6	48	24
0	2∶1	8	54	26
1	1∶1	10	60	28

1.2.6 三七花渣膳食纤维结构和功能特性的测定

1.2.6.1 傅里叶红外光谱（FT-IR） 采用 KBr 圆盘法[19]，将干燥的样品与 KBr 以 1∶150（w/w）的比例混合，研磨均匀后，压制成片，利用傅里叶红外光谱仪在 400~4000 cm^{-1} 范围扫描 32 次，完成光谱分析，绘制 FT-IR 光谱曲线。

1.2.6.2 持水力的测定 在离心管中称取 A-IDF、F-IDF、A-SDF 和 F-SDF 样品各 0.50 g（m_0），加入 10 mL 去离子水，于室温下水合 24 h，经 4000 r/min 离心 15 min 后，除去上清液，称量沉淀物质量（m_1），根据公式计算持水力（W）[20]。

$$W(g/g) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad 式（1）$$

1.2.6.3 持油力的测定 称取 A-IDF、F-IDF、A-SDF 和 F-SDF 样品各 0.50 g（m_0），加入大豆油 25 mL，混合后密封静置 24 h，4000 r/min 离心 15 min，除去上层和管壁残留的油脂，称量吸油后的样品质量（m_2），根据公式计算持油力（O）[20]。

$$O(g/g) = \frac{m_2 - m_0}{m_0} \quad 式（2）$$

1.2.6.4 吸水溶胀力的测定 称取 A-IDF、F-IDF、A-SDF 和 F-SDF 样品各 0.25 g（m_0）于试管中，加入去离子水至 10 mL（V_0），混匀后静置 12 h，记录样品溶胀后的体积（V_1），根据以下公式计算吸水溶胀力（S）[20]。

$$S(mL/g) = \frac{V_1 - V_0}{m_0} \quad 式（3）$$

1.2.6.5 阳离子交换能力的测定 称取 0.50 g（m）A-IDF、F-IDF、A-SDF 和 F-SDF 样品分别浸入 10 mL 0.1 mol/L 盐酸中，静置 24 h 后过滤，将滤渣与 100 mL 的 15% NaCl 溶液混合，用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液进行酸碱滴定，以酚酞作指示剂记录消耗 NaOH 溶液体积（V_1）。空白组以去离子水代替盐酸溶液，平行滴定并记录消耗 NaOH 溶液体积（V_0），根据如下公式计算阳离子交换能力（P）[20]。

$$P(mmol/g) = \frac{(V_1 - V_0) \times 0.1}{m} \quad 式（4）$$

1.2.6.6 胆固醇吸附力的测定 参照 GB 5009.128-2016 食品中胆固醇的测定与 Yang 等[21] 方法，称量 A-IDF、F-IDF、A-SDF 和 F-SDF 样品 1.00 g（m）分别加入 25 mL 蛋黄稀释液（1:9）中，用 NaOH 和 HCl 调节体系 pH 至 2（模拟胃环境）和 pH 至 7（模拟肠道环境），37 ℃ 水浴加热 2 h，8000 r/min 离心 20 min，取上清液后用分光光度计测定 550 nm 吸光度值，带入标准曲线得到上清液中胆固醇的含量（M_2）。用磷酸缓冲液代替样品，与 25 mL 蛋黄稀释液混合以上述方法得到吸附前蛋黄稀释液胆固醇含量（M_1），根据如下公式计算胆固醇吸附力（C）。

$$C(mg/g)=\frac{M_1-M_2}{m}$$　　式（5）

1.2.6.7　亚硝酸盐吸附能力的测定　根据曾蓓蓓等[22]、Hua 等[23] 的方法稍作修改，分别配制 pH 为 2（模拟胃环境）和 7（模拟肠道环境）的 0.1 mg/mL $NaNO_2$ 标准溶液，各取 50 mL 分别加入 0.20 g（M_0）A-SDF、F-SDF、A-IDF、F-IDF 4 种样品，37 ℃ 水浴恒温 2 h，4000 r/min 离心 15 min。取 1 mL 上清液加入 2 mL 的 4 g/L 对氨基苯磺酸溶液，5 min 后加入 1 mL 的 2 g/L 盐酸萘乙二胺溶液，用去离子水定容至 10 mL，静置 15 min，取上清液用分光光度计测定 538 nm 吸光度值，得到亚硝酸盐含量（M_2），以去离子水代替样品做空白，得到吸附前亚硝酸盐含量（M_1），根据以下公式计算亚硝酸盐吸附能力（K）。

$$K(mg/g)=\frac{M_1-M_2}{M_0}$$　　式（6）

1.2.6.8　葡萄糖吸附力的测定　取 0.50 g（m）A-IDF、F-IDF、A-SDF 和 F-SDF 样品分别与 50 mL（V_0）100 mmol/L（C_1）的葡萄糖溶液混合，37 ℃ 水浴恒温 6 h，4000 r/min 离心 10 min，取上清液 1 mL 于 540 nm 处测定吸光度值，带入标准曲线中得到上清液葡萄糖浓度（C_0），根据如下公式计算葡萄糖吸附力（G）[24]。

$$G(mg/g)=\frac{(C_1-C_0)\times V_0}{m}$$　　式（7）

1.2.6.9　胆酸钠吸附能力　采用糠醛比色法，准确称取 0.20 g 胆酸钠溶解于 100 mL 0.15 mol/L 的 NaCl 溶液中，调节 pH 至 7，分别加入 1.00 g（m）A-IDF、F-IDF、A-SDF、F-SDF 样品，充分搅拌后在 37 ℃ 恒温水浴锅中 2 h，取 1 mL 上清液 620 nm 测定吸光度值，带入标准曲线中得到吸附后上清液中胆酸钠含量（m_2），以去离子水为空白得到吸附前胆酸钠含量（m_1）[24]，根据如下公式计算胆酸钠吸附能力（R）。

$$R(mg/g)=\frac{m_1-m_2}{m}$$　　式（8）

1.3　数据处理

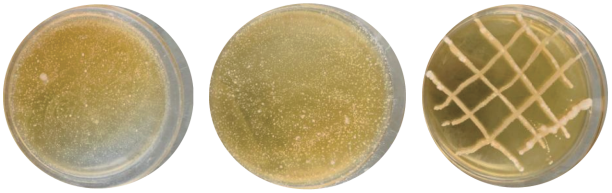
所有实验均重复 3 次，实验数据表示为平均值±标准误，采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行单因素方差分析及显著性分析，采用 Origin 2022 绘图，利用 Box-Behnken 试验设计原理，结合单因素分析结果，运用 Design-Expert 13 软件进行响应面优化。

2　结果与分析

2.1　雪莲菌、红茶菌发酵液菌总数及拮抗实验

根据（GB 4789.2-2022）菌落总数的计算方法，雪莲菌发酵液菌落总数为 2.75×10^5 CFU/mL（图 1a），红茶菌发酵液菌落总数为 2.48×10^5 CFU/mL（图 1b），菌落状态为大量白色点状，呈现明显的菌种富集特征，表明雪莲菌发酵液、红茶菌发酵液中含有大量菌种。

两株菌在 MRS 培养基平板上均生长良好（图 1c），且两株菌交叉接触区域未见明显抑菌圈形成，表明雪莲菌与红茶菌之间未产生拮抗作用，相容性良好，可用于混合发酵，进行后续研究。



(a) 雪莲菌菌落总数　(b) 红茶菌菌落总数　(c) 混菌拮抗效果

图 1　雪莲菌和红茶菌的菌落数及拮抗结果

Fig.1　Colony number and antagonistic results of Kefir and Kombucha

2.2　单因素实验结果

在发酵过程中，微生物更易降解 IDF 为 SDF 或小分子物质，导致 SDF 含量变化更为显著，本实验以 F-SDF 得率为指标进行。

2.2.1　雪莲菌与红茶菌发酵条件对 F-SDF 得率的影响　雪莲菌发酵液与红茶菌发酵液的比例对三七花渣中可溶性膳食纤维得率有显著影响（$P<0.05$）（图 2a）。当二者比例在 3∶1 至 2∶1 时，F-SDF 得率呈上升趋势。在比例为 2∶1 时，F-SDF 得率达到最大值（38.65%），主要由于混菌体系中雪莲菌主导下产生的醋酸、乳酸等有机酸导致 pH 下降，有效抑制了杂菌（如铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌等）的生长繁殖，减少了杂菌对底物（三七花渣）中碳源、氮源等营养物质的竞争性消耗，同时，较低的 pH 环境可能更有利于雪莲菌（通常偏好酸性环境）及其共生微生物（如酵母、乳酸菌）发挥活性，促进其分泌的纤维素酶、半纤维素酶、果胶酶等胞外酶对三七花渣中 IDF 的降解[25−26]，从而将更多 IDF 转化为 SDF。当发酵液比例从 2∶1 降至 1∶3（红茶菌比例增加）时，F-SDF 得率持续下降，这可能源于两菌对有限营养物质的竞争加剧，导致部分菌株活性降低，削弱了整体群落代谢效率及 IDF 降解能力。所有混菌发酵的 F-SDF 得率均显著高于单菌发酵（$P<0.05$），表明雪莲菌与红茶菌混合存在协同增效作用。这种协同效应归因于：不同有机酸（乳酸、醋酸）共同维持了有利的酸性降解环境；两菌分泌的酶谱互补，共同作用于 IDF 组分；混菌体系具有更高的微生态稳定性。根据实验结果，选择 3∶1、2∶1 和 1∶1 三个比例进行后续的响应面优化试验。

2.2.2　菌接种量对 F-SDF 得率的影响　雪莲菌与红茶菌发酵液的添加量对三七花渣中 F-SDF 得率具有显著影响（$P<0.05$）（图 2b）。当接种量在 2% 至 8% 范围内时，F-SDF 得率随接种量增加而呈梯度上升趋势，接种量低时菌体密度不足，导致发酵效率低，未能充分发挥对底物（IDF）的降解能力。接种量为 8% 时达到最大值（36.35%），当接种量进一步增加至 10% 时，F-SDF 得率则开始下降，这种现象可能归

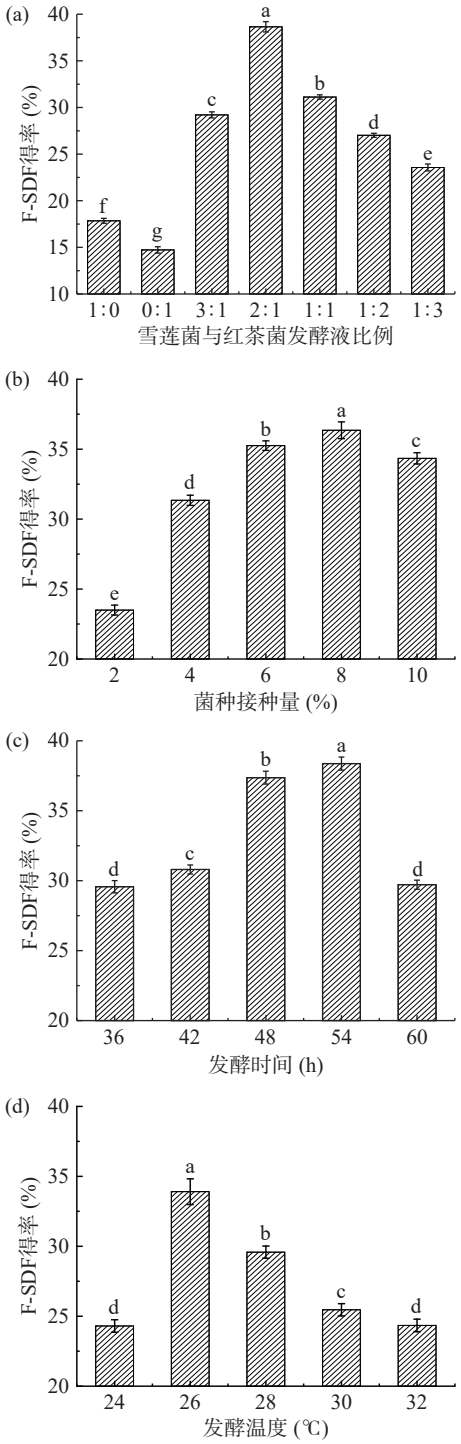


图 2 雪莲菌与红茶菌发酵条件对 F-SDF 得率的影响

Fig.2 Effect of mixed fermentation conditions of kefir grains and Kombucha consortium on F-SDF extraction rate

注: 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

因于过高的菌体密度导致培养体系中有限的营养物质(如碳源、氮源)被快速消耗, 菌体繁殖后期面临营养匮乏, 生长速率下降甚至进入衰亡期, 代谢活性减弱, 同时高密度菌群代谢产生大量有机酸等副产物, 导致环境胁迫(如 pH 过度下降), 菌体呼吸耗氧量剧增, 造成体系溶氧不足[27]。这些因素共同抑制了微生物的整体活性和关键胞外酶(如纤维素酶、半纤维素酶)的合成与分泌, 从而降低 IDF 向 SDF 的转化效率。根据实验结果, 选择 6%、8% 和 10% 三个接种量水平进行后续的响应面优化试验。

2.2.3 发酵时间对 F-SDF 得率的影响 发酵时间对三七花渣 F-SDF 得率具有显著影响(P<0.05)(图 2c)。F-SDF 得率在 36 h 至 54 h 内随发酵时间延长而增加, 并于 54 h 达到峰值(38.37%)。随后延长发酵时间至 60 h, F-SDF 得率呈下降趋势。原因可能是: 发酵后期(>54 h), 易降解碳源和氮源等关键营养物质逐渐耗尽, 作为 SDF 主要来源的 IDF 被持续降解消耗, 导致可用于转化的底物总量减少; 同时, 积累的有机酸(如乳酸、醋酸)等代谢产物浓度升高, 抑制了微生物菌体生长与活性, 降低了关键胞外酶(如纤维素酶、半纤维素酶)的活性与稳定性, 共同削弱了 IDF 降解及 SDF 转化效率[6,28]。原本作为产物的 SDF, 后期变为维持微生物生存的底物, 导致净含量下降。选择 48、54 和 60 h 三个时间点进行后续的响应面优化试验。

2.2.4 发酵温度对 F-SDF 的影响 发酵温度对三七花渣 F-SDF 得率存在显著影响(P<0.05)(图 2d)。在 24 至 26 ℃ 范围内, F-SDF 得率随温度升高而上升, 并于 26 ℃ 时达到最大值(33.91%), 当温度进一步升高至 28~32 ℃ 时, F-SDF 得率则逐渐下降。这种现象可能由于雪莲菌和红茶菌具有其最适生长温度范围, 当温度过高或过低时, 均会抑制菌体的生长与代谢速率, 进而影响 F-SDF 的生成效率[29]。选择 24、26 和 28 ℃ 三个温度水平进行后续的响应面优化试验。

2.3 响应面试验

2.3.1 响应面优化试验模型建立与分析 在单因素实验的基础上, 雪莲菌与红茶菌 4 因素 3 水平发酵对三七花菌渣可溶性膳食纤维得率影响的响应面设计及结果见表 2。经 Design-Expert 13 软件分析得到二次多项式回归模型方程为: $Y=39.60+2.00A+1.03B-1.43C+1.51D+1.04AB-2.07AC+1.22AD+1.02BC+0.0725BD+0.5750CD-5.84A^2-4.18B^2-4.98C^2-0.1084D^2$。

对表 2 响应面试验结果进行方差分析, 结果见表 3, 回归整体模型极显著(P<0.01), 失拟项不显著(P>0.05), 该数学模型可以很好地描述 F-SDF 得率与各因素之间的关系。模型相关系数 R^2 为 0.9853, 说明模型的拟合效果良好, 且试验误差保持在合理范围内。R^2_{Adj} 为 0.9705, R^2_{Pred} 为 0.9314, 说明回归方程能够较好地拟合参数变化。对 F-SDF 得率的影响程度顺序为: 雪莲菌与红茶菌发酵液比例(A)>发酵温度(D)>发酵时间(C)>菌接种量(B)。差异主要源于: 比例变化直接决定两种菌群的竞争-协同结构及底物利用路径, 作用最显著; 时间通过底物充分降解与过度代谢的动态平衡影响得率; 温度则因酶活性和菌群最适生长区间的非线性效应而呈二次关系; 接种量因存在饱和阈值且与其他因素交互有限, 对得率的独立贡献最小。

表 2　响应面试验结果

Table 2　Response surface test results

试验号	A雪莲菌与红茶菌发酵液比例	B 菌接种量	C 发酵时间	D 发酵温度	F-SDF得率（%）
1	0	0	1	1	34.63±0.31
2	0	1	−1	0	31.78±0.62
3	−1	1	0	0	26.72±0.49
4	−1	0	−1	0	26.84±0.09
5	−1	0	0	−1	31.21±0.25
6	0	−1	−1	0	31.34±0.41
7	−1	−1	0	0	27.46±0.41
8	−1	0	0	1	32.47±0.41
9	0	−1	0	1	35.44±0.41
10	0	0	0	0	39.47±0.41
11	1	−1	0	0	29.46±0.41
12	1	0	1	0	27.02±0.41
13	0	1	1	0	32.01±0.41
14	1	0	0	1	38.97±0.41
15	0	0	0	0	39.89±0.41
16	0	1	0	−1	35.46±0.41
17	0	0	−1	1	36.53±0.35
18	0	0	0	0	39.35±0.35
19	−1	0	1	0	27.28±0.35
20	0	0	0	0	40.62±0.35
21	1	1	0	0	32.89±0.35
22	0	−1	1	0	27.48±0.35
23	0	−1	0	−1	33.28±0.35
24	0	0	−1	−1	34.66±0.35
25	1	0	−1	0	34.85±0.35
26	0	1	0	1	37.91±0.35
27	1	0	0	−1	32.82±0.35
28	0	0	1	−1	30.46±0.35
29	0	0	0	0	38.65±0.35

表 3　响应面二次回归方程方差分析的 F-SDF 得率结果

Table 3　Response surface quadratic regression equation analysis of F-SDF extraction rate results

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值	显著性
回归模型	536.10	14	38.29	66.90	<0.0001	**
A	48.12	1	48.12	84.07	<0.0001	**
B	12.63	1	12.63	22.06	0.0003	**
C	24.42	1	24.42	42.67	<0.0001	**
D	27.18	1	27.18	47.78	<0.0001	**
AB	4.35	1	4.35	7.59	0.0155	*
AC	17.10	1	17.10	29.87	<0.0001	**
AD	5.98	1	5.98	10.44	0.0060	**
BC	4.18	1	4.18	7.31	0.0172	*
BD	0.02	1	0.05	0.04	0.8508	ns
CD	1.32	1	1.32	2.31	0.1508	ns
A^2	221.20	1	221.20	386.44	<0.0001	**
B^2	113.59	1	113.59	198.44	<0.0001	**
C^2	160.77	1	160.77	280.86	<0.0001	**
D^2	0.08	1	0.08	0.13	0.7206	ns
残差	8.01	14	0.57			
失拟项	5.91	10	0.59	1.12	0.4963	ns
纯误差	2.11	4	0.53			
合计	544.12	28				

注：**表示差异极显著（*P*<0.01），*表示差异显著（*P*<0.05），ns表示差异不显著（*P*>0.05）。

2.3.2　响应面交互作用分析　根据上述试验结果，利用 Design-Expert13.0 软件绘制响应面及等高线图（见图 3）。

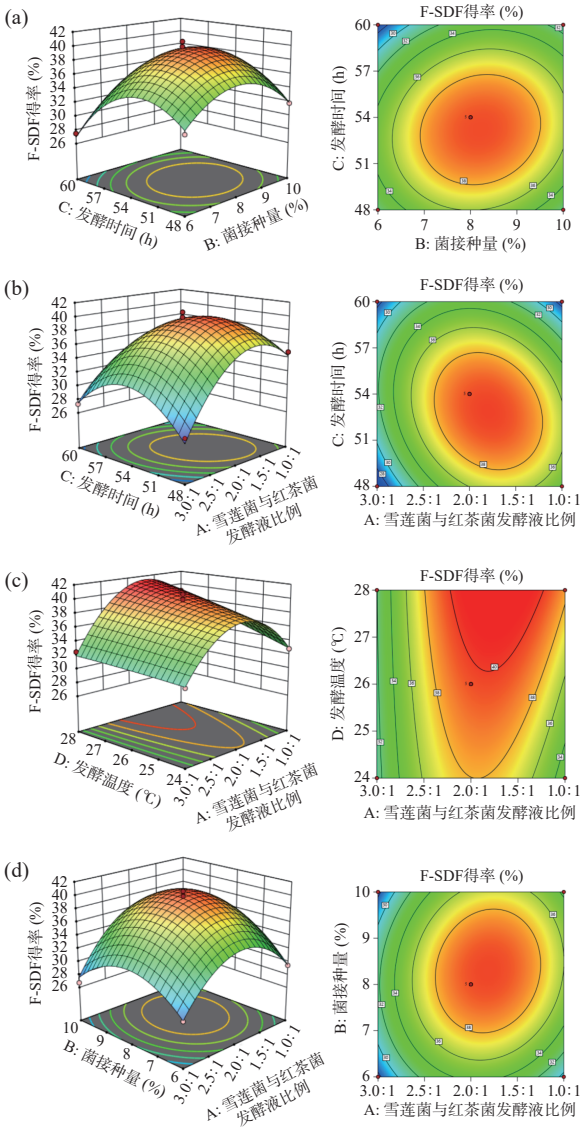


图 3　各因素交互作用对 F-SDF 得率影响

Fig.3　Effects of interaction of factors on the extraction rate of F-SDF

由表 3 方差分析结果可知，雪莲菌与红茶菌发酵液比例（A）、菌接种量（B）、发酵时间（C）、发酵温度（D）四个因素对三七花渣 F-SDF 得率均具有显著影响。其中，雪莲菌与红茶菌发酵液比例为影响得率的最关键因素。方差分析进一步表明，该因素分别与接种量（A×B）、发酵温度（A×D）和发酵时间（A×C）之间的交互作用均对得率产生显著影响，而接种量与发酵温度（B×D）、发酵时间与温度（C×D）之间的交互作用则不显著。

等高线图（图 3）也可以直观反映出各因素交互作用对得率的影响趋势：当雪莲菌与红茶菌发酵液比为（1∶1~2∶1）、菌液接种量（6%~8%）、发酵时间（48~54 h）与发酵温度（24~28 ℃）时，F-SDF 得率较高，而当比例过高或过低超出上述优化范围时，得率均出现明显下降。等高线分析结果与方差分析结论一致，说明各因素及其交互作用对 F-SDF 得率有显著影响。通过优化获得最佳工艺参数为：菌液比例 1.85∶1、菌接种量 7.66%、发酵时间 52.53 h、发酵温

度 27.73 ℃，模型预测得率为 40.94%，根据可操作性调整为菌液比例 2∶1、菌接种量 8%、发酵时间 53 h、发酵温度 28 ℃。在此优化工艺下进行 3 次平行实验，得到发酵后三七花渣 SDF 实际得率均值为 40.32%，与预测值吻合，说明该模型能有效预测三七花渣 SDF 的得率。

2.4 发酵前后三七花渣膳食纤维结构和功能特性的测定

2.4.1 发酵前后三七花渣 FT-IR 分析 将使用雪莲菌与红茶菌混合发酵液发酵的三七花渣和没有处理的三七花渣中 SDF、IDF 进行红外光谱分析，结果见图 4。

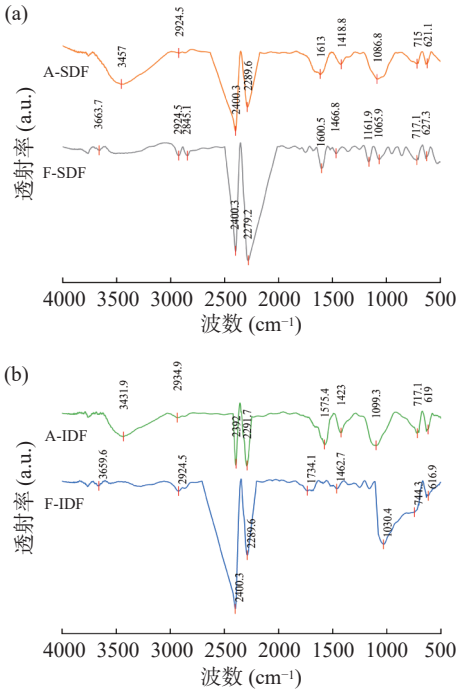


图 4 发酵前后三七花渣 SDF 和 IDF 的 FTIR 光谱

Fig.4 FTIR spectra of SDF and IDF in *P. notoginseng* flower residue before and after fermentation

注：(a)三七花渣发酵前后 SDF 值变化；(b)三七花渣发酵前后 IDF 值变化。

傅里叶变换红外光谱(FTIR)(图 4)显示，三七花渣 SDF 与 IDF 均呈现典型多糖特征吸收峰，但发酵前后峰形发生了明显改变，表明发酵过程改变了其内部化学结构。具体表现为：发酵后样品在 3430~3670 cm^{-1}(O-H 伸缩振动)峰强减弱，表明纤维内部的氢键作用减少[30]；在 2840~2960 cm^{-1}(C-H 伸缩振动)与纤维素结构相关的区域，在发酵后吸收峰有所增强，提示发酵可能导致了鼠李糖等成分含量的增加[31]；在 1575~1735 cm^{-1}(C=O 伸缩振动)峰强减弱，对应糖醛酸的羰基[32]。可能与糖醛酸含量变化或羧基暴露程度改变有关，进而影响其阳离子交换能力；在 1400 cm^{-1}(木质素相关结晶带)峰强较高，这可能是由于木质素的存在[33]；在 1030~1162 cm^{-1}(C-O 伸缩振动)区域，发酵前后 SDF 谱图差异表明多糖氢键断裂及非晶区重排形成了新结构特征[34]；其他区域如 600 cm^{-1} 附近观察到了 β-吡喃单糖的特征峰[35]；2279~2401 cm^{-1} 区域的峰强在发酵后增强，可能与特定基团振动或环境因素有关。

未发酵三七花渣纤维和发酵后纤维均含有纤维素、半纤维素、木质素等膳食纤维的典型组分。发酵处理虽然没有产生全新的官能团，但它显著改变了原有官能团(如羟基、羧基、甲基/亚甲基等)的数量丰度和分子间/分子内的键合状态(如氢键)，氢键网络重组促进亲水基团(羟基、羧基)暴露，增强水合能力，SDF 的得率上升能改变纤维的溶解性，增强益生元的活性。这些结构层面的改变，可为三七花渣膳食纤维(尤其是可溶性部分)在功能食品的应用上提供依据。

2.4.2 发酵前后三七花渣膳食纤维的水合能力、阳离子交换能力分析 未发酵三七花渣纤维和发酵后三七花渣纤维水合特性和阳离子交换能力测定结果见表 4。

表 4 发酵前后三七花渣 SDF 和 IDF 的水合特性和阳离子交换能力

Table 4 Hydration characteristics and cation exchange capacity of SDF and IDF in *P. notoginseng* flower residue before and after fermentation

样品	持水力 (g/g)	持油力 (g/g)	吸水溶胀力 (mL/g)	阳离子交换能力 (mmol/g)
F-IDF	4.08±0.24^{a}	1.75±0.21^{bc}	6.52±0.33^{a}	0.20±0.02^{b}
F-SDF	2.38±0.19^{b}	3.76±0.44^{a}	5.13±0.43^{b}	0.27±0.01^{a}
A-SDF	1.32±0.27^{c}	2.22±0.26^{b}	2.42±0.27^{c}	0.17±0.01^{b}
A-IDF	2.15±0.31^{b}	0.99±0.25^{c}	3.90±0.54^{b}	0.09±0.01^{c}

注：不同字母表示样品间差异显著(P<0.05)。

持水力是评价膳食纤维水分保持能力的核心参数，较高的持水性能不仅能通过增加粪团体积促进肠道蠕动，还能改善膳食纤维的结构功能特性及感官品质[36]。由表 4 可知，三七花渣 IDF 的持水力显著高于 SDF(P<0.05)，发酵后膳食纤维持水力较未发酵组显著提升，其中 SDF 提高 80.30%，IDF 提高 89.77%。这一结果与混合发酵过程中的酶解作用密切相关：红茶菌与雪莲菌在协同发酵过程中分泌的纤维素酶、半纤维素酶等活性酶类，可有效降解三七花渣膳食纤维中的纤维素、半纤维素等大分子物质，破坏其原有的致密纤维结构，使其形成疏松多孔的微观形态；纤维结构的疏松化显著增大了比表面积，进而增加了水分吸附位点，最终实现持水力的显著提升[37−38]。该结论与 FTIR(图 4)分析结果高度一致，发酵后膳食纤维的红外光谱显示，氢键作用特征峰强度减弱，而原本被致密纤维结构包裹或新形成的分子内键合亲水基团(如羟基-OH、羧基-COOH)特征峰强度显著增强。这表明发酵不仅通过酶解作用改变了纤维的宏观结构，还通过暴露更多亲水基团进一步增强了纤维与水分子的相互作用能力。综上，混合发酵可使三七花渣膳食纤维形成更开放的疏松网络结

构，从结构优化与基团暴露两方面协同提升纤维的水合能力，最终表现为持水力的显著增强。

吸水溶胀力主要取决于膳食纤维的无定形结构及其表面亲水基团的丰度[39]，F-DF 吸水溶胀力较 A-DF 显著提升（P<0.05），其中 SDF 与 IDF 增幅分别为 111.98% 和 67.18%，这一变化与图 4 中羧基亲水基团含量的增加一致。持水性和吸水溶胀力的提升表明，改性纤维可作为亲水胶体的替代，可以改善低脂食品的质构特性，具备在低脂食品开发中应用的潜力。

持油力是评价膳食纤维油脂吸附能力的关键指标，F-DF 的持油力较 A-DF 显著提升（P<0.05），其中 SDF 与 IDF 发酵后持油力分别提高了 69.37% 和 76.77%，与图 4 所示结构变化一致，包括氢键网络的破坏（3430~3670 cm^{-1} 峰减弱）、纤维结构疏松化（1030~1162 cm^{-1}），疏水基团丰度上升（2840~2960 cm^{1} 峰增强）。SDF 的多孔结构提供更多油脂结合位点，发酵进一步疏松纤维网络，疏水基团暴露增强脂质结合[35]，油脂吸附能力增强，可将改性纤维用于低热量食品的开发。

阳离子交换能力（CEC）通过调节消化道 pH 与渗透压发挥生理保护作用[3]。F-DF 和 A-DF 间均存在显著差异（P<0.05），F-DF 的 CEC 优于 A-DF，其中 F-SDF 与 F-IDF 分别提升 58.82% 和 122.22%，与图 4 中破坏氢键（3430~3670 cm^{-1} 峰减弱）释放被束缚的羧基，重组非晶区（1030~1162 cm^{-1}）扩大了离子扩散通道，增加羧基可利用性（1575~1735 cm^{-1} 峰减弱），阳离子结合位点密度上升结论一致，表明发酵改性后的三七花渣可作为天然螯合剂，降低食品重金属残留。

2.4.3　发酵前后三七花渣膳食纤维的胆固醇、亚硝酸盐吸附力分析　在相同 pH 条件下，SDF 的胆固醇吸附能力均显著高于 IDF（P<0.05）（图 5）。经混合发酵处理的膳食纤维其胆固醇吸附力较未发酵组显著提升（P<0.05）。F-SDF 组在 pH2 和 pH7 条件下较 A-SDF 吸附力分别提升 24.77% 与 22.67%，F-IDF 组在 pH2 和 pH7 条件下吸附力较 A-IDF 分别提升 20.65% 与 29.45%，与图 4 中疏水峰增强、非晶区扩大结果一致。发酵后膳食纤维粒径减小且粒径分布均一化，显著增加了有效吸附表面积，同时结构变化暴露更多活性位点，促进胆固醇分子结合[40−41]。在 pH7（模拟小肠环境）下，SDF 与 IDF 的胆固醇吸附力均明显高于 pH2（模拟胃环境）条件，这表明三七花渣膳食纤维的胆固醇吸附作用主要发生于小肠阶段，其次在胃部发生。

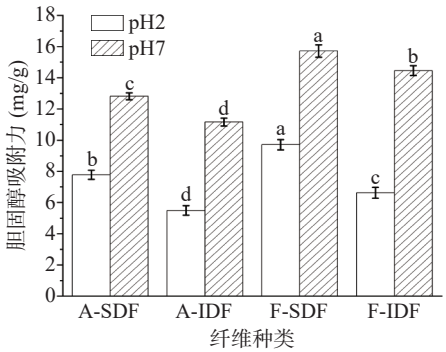


图 5　不同纤维素种类的胆固醇吸附能力

Fig.5　Cholesterol adsorption capacity of different fiber types

注：不同字母表示样品间差异显著（P<0.05），图 6、图 7 同。

在相同 pH 条件下，SDF 的亚硝酸盐吸附能力显著高于 IDF，混菌发酵处理后 DF 较未发酵组吸附力显著提升（P<0.05）（见图 6）。SDF 在 pH2 与 pH7 条件下吸附力分别提升 21.48% 和 19.72%，IDF 在 pH2 与 pH7 条件下吸附力分别提升 19.28% 和 24.90%，发酵导致纤维粒径减小及活性基团暴露增加；膳食纤维中的多糖组分与酚酸类物质形成稳定复合物[42]，与图 4 中发酵处理后三七花渣羧基增加一致，提供了新的吸附位点，通过配位作用强力吸附亚硝酸根离子。模拟胃环境吸附力显著高于模拟肠环境吸附力，可能是由于碱性条件（pH 上升）增加纤维表面负电荷，降低有效结合位点密度；增强亚硝酸根离子（NO_2^-）静电斥力，抑制吸附效率，证实了三七花渣膳食纤维的亚硝酸盐清除作用主要发生在胃部。

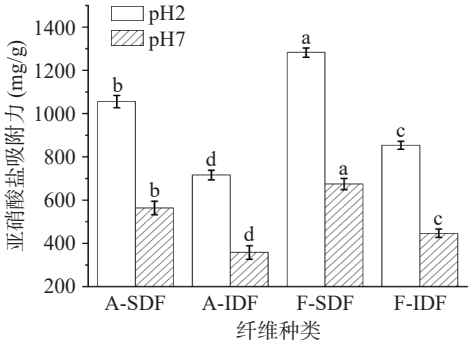


图 6　不同纤维素种类的亚硝酸盐吸附能力

Fig.6　Nitrite adsorption capacity of different fiber types

发酵后的三七花渣改性纤维对胆固醇及亚硝酸盐的吸附能力的提升，实现对胆固醇的高效靶向吸附及有效清除亚硝酸盐，可应用于低脂、低硝肉制品等健康食品开发，满足营养提升与安全风险控制的双重需求。

2.4.4　发酵前后三七花渣对葡萄糖及胆酸钠吸附力影响　三七花渣 F-DF 的葡萄糖吸附力显著高于 A-DF（P<0.05）（图 7），SDF 葡萄糖吸附力提高了 61.18%，IDF 葡萄糖吸附力提高了 72.66%。葡萄糖吸附能力与 SDF 含量及纤维结构疏松度、亲水基团的暴露程度、黏度提升（1575~1735 cm^{-1} 峰减弱）呈正相关，与 Lu 等[43] 结果一致，高 SDF 含量促使纤维形成多孔疏松结构，提升了葡萄糖截留效能。

SDF 胆酸盐吸附力显著高于 IDF（P<0.05），F-DF 较 A-DF 吸附力显著增加（P<0.05），SDF 与 IDF 增幅分别为 22.50% 和 22.61%，与疏水基团增加、羟

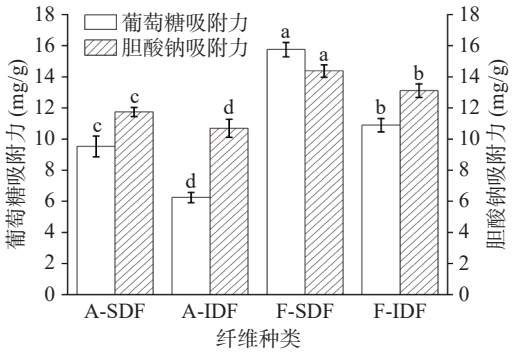


图 7 不同纤维素种类的葡萄糖及胆酸钠吸附能力

Fig.7 Adsorption capacity of glucose and sodium cholate of different fibers types

基暴露、木质素存在(1400 cm^{-1})协同相关。由于发酵暴露亲脂基团(如疏水蛋白域)形成疏松多孔结构,比表面积增大,表面活性位点(-COOH/-OH)通过螯合作用提升了结合胆酸盐能力,与 Luo 等[44] 研究结果一致。发酵改性纤维通过羧基介导的离子交换与凝胶网络物理截留,同步实现胆酸盐清除与葡萄糖缓释功能。二者协同可开发降糖降脂双效食品,为糖尿病合并高血脂人群提供精准营养解决方案。

3 结论

雪莲菌与红茶菌混合对三七花渣进行发酵,通过酶-酸协同效应(雪莲菌高产酶+红茶菌产酸)实现纤维大分子解聚、活性基团(-COOH/-OH)暴露、表面吸附位点密度增加,进而增加了水分吸附位点,最终实现持水力的显著提升。F-SDF 比 A-SDF 持水力、吸水溶胀力、持油力、阳离子交换能力比 A-SDF 分别提升 80.30%、111.98%、69.37%、58.82%,F-IDF 比 A-IDF 持水力、吸水溶胀力、持油力、阳离子交换能力分别提高 89.77%、67.18%、76.77%、122.22%。F-SDF 和 F-IDF 葡萄糖的吸附能力分别提高 61.18% 和 72.66%,胆酸钠吸附能力分别提高 22.50% 和 22.61%。在模拟胃肠环境下,pH2.0 条件下 F-SDF 和 F-IDF 胆固醇吸附能力分别提高 24.77% 和 20.65%,亚硝酸盐吸附能力分别提高 21.48% 和 19.28%,pH7.0 条件下胆固醇吸附能力分别提高 22.67% 和 29.45%、亚硝酸盐吸附能力分别提高 19.27% 和 24.90%,均显著增强。改性后的纤维可作为功能性成分应用于血糖调控食品(如低 GI 烘焙品)、脂质管理食品(如低脂肉制品)及食品安全增效剂(如降硝腌制品),为药食同源废弃资源高值化利用提供新策略。发酵后的 DF 的组分变化、多孔结构与吸附效能的构效关系及体内生理活性还需进一步研究。

© 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] 曲媛, 刘英, 黄璐琦, 等. 三七地上部分营养成分分析与评价[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(4): 601−605. [QU Yuan, LIU Ying, HUANG Luqi, et al. Analysis and evaluation of nutritive elements in aerial part of *Panax notoginseng*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(4): 601−605.]

[2] 刘贵有, 杨玉春, 杨江蓉, 等. 三七残渣的研究与应用进展[J]. 云南化工, 2024, 51(8): 28−32. [LIU Guiyou, YANG Yuchun, YANG Jiangrong, et al. Research and application of *Panax notoginseng* residue[J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(8): 28−32.]

[3] 权冰艳, 夏婷, 王永琪, 等. 丹参渣和三七渣复合物中膳食纤维的提取工艺及其理化特性[J]. 天津科技大学学报, 2023, 38(4): 1−8. [QUAN Bingyan, XIA Ting, WANG Yongqi, et al. Extraction and physicochemical properties of dietary fiber from *Salvia miltiorrhiza* residue and *Panax notoginseng* residue complex[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2023, 38(4): 1−8.]

[4] 王娜, 樊秋霞, 袁亚宏, 等. 雪莲菌发酵提高枸杞原浆甜菜碱含量的工艺优化及品质分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 72−80. [WANG Na, FAN Qiuxia, YUAN Yahong, et al. Process optimization and quality analysis to increase the betaine content of wolfberry pulp through fermentation[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(2): 72−80.]

[5] FIORDA F A, de MELO PEREIRA G V, THOMAZ-SOCCOL V, et al. Microbiological, biochemical, and functional aspects of sugary kefir fermentation-A review[J]. Food Microbiology, 2017, 66: 86−95.

[6] 荆淳, 岳田利, 袁亚宏, 等. 雪莲菌发酵对苹果渣膳食纤维结构和功能特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 1−7,23. [JING Chun, YUE Tianli, YUAN Yahong, et al. Effects of Tibetan kefir grain fermentation on the structure and functional properties of dietary fiber from apple pomace[J]. Food Research and Development, 2023, 44(15): 1−7,23.]

[7] 杨晨夕, 张珮珮, 徐阳, 等. 发酵改性膳食纤维的生理功能及其在食品中的应用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 342−353. [YANG Chenxi, ZHANG Peipei, XU Yang, et al. Physiological function of fermented modified dietary fiber and its application in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 342−353.]

[8] AHMED R F, HIKAL M S, ABOU-TALEB K A. Biological, chemical and antioxidant activities of different types Kombucha[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2020, 65(1): 35−41.

[9] BARAKAT N, BOUAJILA J, BEAUFORT S, et al. Development of a new kombucha from grape pomace: The impact of fermentation conditions on composition and biological activities[J]. Beverages, 2024, 10(2): 29.

[10] 梅瀚杰, 胡文锋. 国内外红茶菌研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 335−341,351. [MEI Hanjie, HU Wenfeng. Research progress of kombucha study in the world[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 335−341,351.]

[11] 郑润敏, 戴易祎, 谢其辉, 等. 生浆豆渣混菌发酵过程中的营养品质和功能特性变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 173−180. [ZHENG Runmin, DAI Yiyi, XIE Qihui, et al. Changes in nutritional quality and functional characteristics of raw pulp okara during mixed fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(2): 173−180.]

[12] 杨欢, 刘敬科, 李朋亮, 等. 乳酸菌协同酵母菌发酵杂粮面包降糖效果研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 211−218. [YANG Huan, LIU Jingke, LI Pengliang, et al. Research progress on hypoglycemic effect of coarse grain bread fermented by lactic

acid bacteria and yeast[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 211−218.]

[13] GUO Tinghao, HE Zongyi, WANG Fang, et al. Effects of enzymes combined with *Lactobacillus plantarum* and *Bifidobacterium* on the properties and *in vitro* hypoglycemic activity of sea buckthorn insoluble dietary fiber[J]. Food Bioscience, 2025, 68: 106472.

[14] PAPADOPOULOU D, CHRYSIKOPOULOU V, RAMPAOUNI A, et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of water kefir microbiota and its bioactive metabolites for health promoting bio-functional products and applications[J]. AIMS Microbiology, 2024, 10(4): 756−811.

[15] 肖萍, 赵可欣, 蔡倩倩, 等. 以藜麦为基质的红茶菌发酵液抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(2): 37−44. [XIAO Ping, ZHAO Kexin, CAI Qianqian, et al. Antioxidant activity of fermented quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with kombucha consortium[J]. Food Research and Development, 2023, 44(2): 37−44.]

[16] 胡永正, 沈秋霞, 文晓慧, 等. 红茶菌发酵液结合斑鸠占叶汁制作果冻的工艺优化[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 140−145. [HU Yongzheng, SHEN Qiuxia, WEN Xiaohui, et al. Process optimization of jelly with fermentation broth of kombucha and *Premna microphylla* Turcz[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1): 140−145.]

[17] 于亭, 王振雷. 双歧杆菌 MRS 培养基优化研究[J]. 现代食品, 2019(22): 151−154. [YU Ting, WANG Zhenlei. Medium MRS optimization of *Bifidobacterium*[J]. Modern Food, 2019(22): 151−154.]

[18] 胡羚, 张惠玲, 周慧宁, 等. 马铃薯淀粉汁水混菌发酵条件优化及应用[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(10): 63−72. [HU Ling, ZHANG Huiling, ZHOU Huining, et al. Optimization and application of fermentation conditions of potato starch juice and application[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(10): 63−72.]

[19] ULLAH I, YIN T, XIONG S B, et al. Effects of thermal pretreatment on physicochemical properties of nano-sized okara (soybean residue) insoluble dietary fiber prepared by wet media milling[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 18−26.

[20] BAI Xiaoli, HE Yi, QUAN Bingyan, et al. Physicochemical properties, structure, and ameliorative effects of insoluble dietary fiber from tea on slow transit constipation[J]. Food Chemistry, 2022, 14: 100340.

[21] YANG Chaoran, SI Jingyu, CHEN Yi, et al. Physicochemical structure and functional properties of soluble dietary fibers obtained by different modification methods from *Mesona chinensis* Benth. residue[J]. Food Research International, 2022, 157: 111489.

[22] 曾蓓蓓, 常锦玉, 吕庆云, 等. 黑糯米米糠中水不溶膳食纤维功能特性研究[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(6): 51−55. [ZENG Beibei, CHANG Jinyu, LÜ Qingyun, et al. Functional properties of insoluble dietary fiber from black glutinous rice bran[J]. Food and Nutrition in China, 2019, 25(6): 51−55.]

[23] HUA Mei, LU Jiaxi, QU Di, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522−529.

[24] 郭增旺, 马萍, 刁静静, 等. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 106−112. [GUO Zengwang, MA Ping, DIAO Jingjing, et al. Physicochemical and adsorption properties of ultramicro insoluble dietary fiber from soybean hull[J]. Food Science, 2018, 39(5): 106−112.]

[25] 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.

[26] MARQUES V D, FRANZOLIN M R, SANABANI S S, et al. A new class of antimicrobial molecules derived from kefir, effective against *Pseudomonas aeruginosa* and methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) strains[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 17434.

[27] SUN Feiyang, LIU Siyi, CHE Xinying, et al. High-density fermentation of *Lactobacillus plantarum* P6: Enhancing cell viability via sodium alginate enrichment[J]. Foods, 2024, 13(21): 3407.

[28] GHIMIRE A, TRABLY E, FRUNZO L, et al. Effect of total solids content on biohydrogen production and lactic acid accumulation during dark fermentation of organic waste biomass[J]. Bioresource Technology, 2018, 248: 180−186.

[29] AUNG T, LEE W H, EUN J B. Metabolite profiling and pathway prediction of laver (*Porphyra dentata*) kombucha during fermentation at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133636.

[30] 王鑫, 课净璇, 王亚斌, 等. 黄精渣水不溶性膳食纤维提取工艺优化及特性表征[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 53−64. [WANG Xin, KE Jingxuan, WANG Yabin, et al. Extraction process optimization and characterization of water-insoluble dietary fiber from *Polygonatum sibiricum* residue[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 53−64.]

[31] 陈燕霞, 赵东, 刘磊, 等. 不同加工方式对米糠可溶性膳食纤维结构和抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 124−131. [CHEN Yanxia, ZHAO Dong, LIU Lei, et al. Effects of different processing methods on the structure and antioxidant activity of soluble dietary fibers in rice bran[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(6): 124−131.]

[32] YU Ying, ZHAO Jingjing, LIU Jianhua, et al. Improving the function of pickle insoluble dietary fiber by coupling enzymatic hydrolysis with HHP treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(12): 4634−4643.

[33] 丁彩云, 糟帆, 马玉婷, 等. 高温-复合酶法改性小米糠膳食纤维工艺优化及结构与功能分析[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 67−75. [DING Caiyun, ZAO Fan, MA Yuting, et al. Optimizing the preparation process of dietary fiber from millet bran modified by high temperature-composite enzyme and analysis of its structure and functional properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 67−75.]

[34] 汪文君, 周宁, 韩东晶, 等. 改性对柿子渣不溶性膳食纤维的理化特性和结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 221−226. [WANG Wenjun, ZHOU Ning, HAN Dongjing, et al. Effects of modification on physicochemical properties and structure of insoluble dietary fiber from persimmon pomace[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 221−226.]

[35] 张慧娟, 靳程茗, 吕世豪, 等. 黑麦麸膳食纤维的结构和功能特性研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(8): 84−93. [ZHANG Huijuan, JIN Chengming, LÜ Shihao, et al. Studies on structure and functional characteristics of dietary fiber from rye bran[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(8): 84−93.]

[36] LI Yina, YU Yuanshan, WU Jijun, et al. Comparison the structural, physicochemical, and prebiotic properties of *Litchi* pomace dietary fibers before and after modification[J]. Foods, 2022, 11(3): 248.

［37］ KITWETCHAROEN H, PHUNG L T, KLANRIT P, et al. Kombucha healthy drink-recent advances in production, chemical composition and health benefits[J]. Fermentation, 2023, 9: 48.
［38］ LU M, WANG X, SUN G, et al. Fine structure of Tibetan kefir grains and their yeast distribution, diversity, and shift[J]. PLoS One, 2014, 9(6): e101387.
［39］ WANG L, PENG T Y, CHEN Y X, et al. Effects of acid treatment on the physicochemical and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber[J]. Cereal Chemistry, 2021, 99(2): 343−354.
［40］ TAPASYA K, BARAN A D, CHANDRA S D. Effect of extrusion and enzyme modification on functional and structural properties of pea peel (*Pisum sativum* L.) insoluble dietary fibre and its effect on yogurt rheology[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(10): 6668−6677.
［41］ 王彬彬, 李茂淋, 王三, 等. 提取方法对猴头菇不溶性膳食纤维结构、理化及功能特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(17): 14−22. ［WANG B B, LI M L, WANG S, et al. Effects of extraction methods on structure, physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from *Hericium erinaceus*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(17): 14−22.］
［42］ 王俊杰, 罗钰湲, 黄越, 等. 球磨-酶法联合工艺制备菠萝皮渣不溶性膳食纤维: 结构与理化特性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(4): 162−169. ［WANG J J, LUO Y Y, HUANG Y, et al. Preparation of insoluble dietary fiber from pineapple peel by ball milling-enzymatic combined method: Study on stracure and physicochemical properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 162−169.］
［43］ LU Y F, TESSA K, A I M S, et al. The effect of colloid milling on the microstructure and functional properties of asparagus dietary fibre concentrates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 169: 114013.
［44］ LUO X, WANG Q, ZHENG B, et al. Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 109: 1003−1009.