



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

## 《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：棘孢木霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维工艺优化  
作者：庞伟，韩新新，王珊珊，朱振元  
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20250008  
收稿日期：2025-01-11  
网络首发日期：2025-07-29  
引用格式：庞伟，韩新新，王珊珊，朱振元. 棘孢木霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维工艺优化[J/OL]. 天津科技大学学报.  
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250008>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



## 棘孢木霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维工艺优化

庞伟, 韩新新, 王珊珊, 朱振元

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 可溶性膳食纤维(SDF)能够调节肠道菌群、提高机体免疫,但麦麸中其含量相对较低。本实验旨在利用单因素实验和响应面实验,以SDF得率为考察指标,优化棘孢木霉发酵麦麸SDF的工艺条件。结果表明:在棘孢木霉接种量11.80%,发酵时间46h,料液比1:13.30的条件下,经发酵后,麦麸SDF得率由(6.25±0.52)%提高至(22.38±0.32)%。未发酵麦麸可溶性膳食纤维(W-SDF)的总糖含量为(78.69±1.24)%,发酵后麦麸可溶性膳食纤维(F-SDF)的含量为(88.78±1.21)%。W-SDF的还原糖含量为(6.72±0.26)%,F-SDF的含量为(7.12±0.12)%。在发酵过程中,FPA、CMCase、 $\beta$ -Gase最高酶活力分别为(5.88±0.08)U/mL、(11.83±0.42)U/mL和(9.17±0.18)U/mL。由此可见通过棘孢木霉发酵显著提高麦麸中SDF。

**关键词:** 麦麸; 基本成分; 棘孢木霉; 发酵; 可溶性膳食纤维

中图分类号: S144.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(0000)00-0000-00

## Process Optimization on Extracting Soluble Dietary Fiber of Wheat Bran by

### *Trichoderma asperellum* Fermentation

PANG Wei, HAN Xinxin, WANG Shanshan, ZHU Zhenyuan

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Soluble dietary fibers (SDF) which is relatively low levels in wheat bran conducive to regulate intestinal flora and improve immunity of the organism. And the experiment aimed to take yield of SDF as index and utilize single-factor experiments and response surface methodology to optimize the fermentation conditions for enhancing the yield of SDF from wheat bran. The results demonstrate that under the optimal conditions of a *Trichoderma asperellum* inoculum of 11.80%, the fermentation time of 46 hours, and a solid-to-liquid ratio of 1 : 13.30, the yield of SDF from wheat bran increases significantly from (6.25±0.52)% to (22.38±0.32)% after fermentation. The contents of unfermented soluble dietary fiber (W-SDF) total sugar is (78.69±1.24)% while total sugar content of soluble dietary fiber fermented (F-SDF) is (88.78±1.21)%. The content of W-SDF reducing sugar is (6.72±0.26)% while F-SDF's is (7.12±0.12)%. During the fermentation process, the highest enzyme activity of FPA, CMCase,  $\beta$ -Gase were (5.88±0.08) U/mL, (11.83±0.42) U/mL, (9.17±0.18) U/mL respectively. The results indicate the yield of soluble dietary fibers from wheat bran by *Trichoderma asperellum* Fermentation increase significantly.

**Key words:** wheat bran; basic components; *Trichoderma asperellum*; fermentation; soluble dietary fibers

小麦是人类最古老的栽培作物之一,作为世界各国多样化饮食中的主食,小麦产量一直稳定增长。麦麸作为小麦加工的主要副产物,在我国年产量可达2000万吨以上,但其主要应用于饲料,综合利用率低<sup>[1-2]</sup>。麦麸中含有丰富的膳食纤维、蛋白质、酚酸、多糖类物质<sup>[3]</sup>,然而麦麸结构紧密且质地坚硬,

含有大量的不溶性膳食纤维(IDF),从而影响麦麸的广泛应用<sup>[4-5]</sup>。许锐<sup>[6]</sup>对麦麸进行改性后,可溶性膳食纤维(SDF)含量提高24.37%,将麦麸加入面团以后,可以促进面筋蛋白形成更稳定的结构,对面条品质有显著改良作用,提高面条中抗性淀粉含量,延缓面条的消化速率,并且面条的蒸煮吸水

收稿日期: 2025-01-11; 修回日期: 2025-05-10

基金项目: 天津市重点研发计划项目(20YFZCSN00210); 天津市农业产学研用合作“揭榜挂帅”项目(GBGG202429)

作者简介: 庞伟(1988—),女,河北唐山人,博士研究生; 通信作者: 朱振元,教授, zhuozhenyuan@tust.edu.cn

率、蒸煮吸水率降低,更有利于维持肠道健康,维持饱腹感。谢贵各<sup>[7]</sup>通过植物乳杆菌与米曲霉对麦麸进行共同发酵改性,改性后麦麸的可食用价值得到提高,同时以改性麦麸和菊粉为主要原料,开发出一款高膳食纤维营养饼干。在食品加工方面,罗威等<sup>[8]</sup>以紫薯和麦麸膳食纤维、面粉为主要原料,研制出紫薯麦麸软欧包,相比于普通欧包,其在比容、质构方面差异不显著,在感官评价、营养成分、风味物质种类与相对含量方面明显优于普通欧包。

为提高麦麸中膳食纤维的利用率,通常对麦麸进行改性,相比于蒸汽爆破、挤压膨化等物理方法以及酸碱处理等化学方法,生物改性通过酶法、微生物发酵的方式更加温和、绿色、安全<sup>[9-10]</sup>。木霉属真菌具有很强的纤维素降解能力,多数木霉菌可产生如纤维素酶、漆酶、木聚糖酶等多种酶系,分解利用纤维素、半纤维素、几丁质等多聚物,在农业废弃物降解、生产工业酶制剂等方面应用广泛<sup>[11-13]</sup>。Jia等<sup>[14]</sup>利用绿色木霉对脱脂米糠进行发酵,优化发酵工艺表明,在接种量10%、pH 5.8、培养41 h条件下,SDF的产量从10.5%提高到33.4%。Yang等<sup>[15]</sup>利用绿色木霉与黑曲霉混合发酵脐橙果皮,结果表明混合发酵可显著提高复合纤维素酶活力,SDF得率从6.63%提高到15.73%。范莉莉等<sup>[16]</sup>从棘孢木霉中得到一种漆酶,该酶对有机染料孔雀绿、结晶紫、刚果红、中性红和甲基橙均有降解能力,降解率分别为69.1%、60.9%、54.6%、40.1%、22.2%。刘和<sup>[17]</sup>通过基因工程法和发酵法提高棘孢木霉T4包括ech42蛋白在内的的几丁质酶产量,从而强化棘孢木霉抵抗病虫害的能力,同时证明cdk5/pho85在一定程度上可以调控Ech42蛋白的表达。陈守菊<sup>[18]</sup>研究棘孢木霉的漆酶基因表明*lac1*、*lac2*和*lac3*编码的漆酶蛋白Lac1、Lac2和Lac3分别由566、600和590个氨基酸组成;相对分子质量分别为62050、66340和64900;理论等电点分别为4.35、5.43和6.25;其中,蛋白Lac1和Lac2序列中含有信号肽序列,而蛋白Lac3中不存在信号肽序列。蛋白Lac1、Lac2和Lac3中均含有典型的漆酶保守氨基酸序列特征,如L1-L4结构域、SDS-gate结构域和C末端的保守结构域DSGL/I/V等。

以上研究结果表明木霉属真菌具有一定降解纤维素的能力,且成本低廉、安全性高。课题组前期研究中筛选到一株新菌,鉴定为棘孢木霉(*Trichoderma asperellum*),经研究发现该菌株产纤维素酶能力良好,并且对土壤中玉米秸秆降解效

果良好<sup>[19]</sup>,因此棘孢木霉对降解麸皮中膳食纤维的研究具有可行性,为扩大麦麸的应用范围、提高麦麸资源的高值化利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 菌株与原料

实验室从土壤中分离获得菌株,通过纯化培养观察,结合ITSrDNA序列同源性分析方法,鉴定为棘孢木霉(*Trichoderma asperellum*),现保藏于中国普通微生物菌种保藏管理中心(CGMCC),保藏号12071;麦麸购自河南省商丘市农郊。

#### 1.1.2 试剂与仪器

PDA培养基:马铃薯20%,葡萄糖2%,琼脂1.5%~2%,pH自然。PDB液体培养基按照PDA培养基配方配制,不加琼脂。

MRS培养基:葡萄糖20g,酵母膏5g,蛋白胨10g,牛肉膏10g,吐温-80 1 mL,磷酸氢二钾2g,柠檬酸氢二钠2g,乙酸钠5g,硫酸镁0.58g,硫酸锰0.25g,蒸馏水1 L,pH=6.2~6.6。

酵母膏、牛肉膏、酒石酸钾钠、蛋白胨,北京奥博星生物技术有限公司;苯酚、蔗糖、无水氯化钙、结晶氯化镁,天津北方天医化学试剂厂;磷酸氢二钠、磷酸二氢钾,天津鼎国生物技术有限公司;浓硫酸,天津市致远化学试剂厂;无水葡萄糖、乙酸钠、硫酸铵、氯化钠、硫酸镁、硫酸锌、柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液,天津市江天化工技术有限公司;标准葡聚糖、琼脂粉,北京索莱宝生物科技有限公司;硼酸钠,国药集团化学试剂有限公司;吐温-80,阿拉丁试剂(上海)有限公司,酵母膏、牛肉膏、蛋白胨为生化试剂,其他试剂均为分析纯试剂。

TGL-16B型台式离心机、TGL-160-A冷冻离心机,上海安亭科学仪器厂;ESJ205-4型电子天平,沈阳龙腾电子称量仪器有限公司;SP-2102UV型紫外-可见分光光度计,上海光谱仪器有限公司;SU1510型扫描电子显微镜,日本日立公司;900T型原子吸收分光光度,PE公司,SPX-150BSH型生化培养箱,上海新苗医疗器械制造有限公司;PB-10型pH计,赛多利斯科学仪器有限公司;恒温培养振荡器,天津市欧诺仪器仪表有限公司

#### 1.2 麦麸基本成分的测定

麦麸的水分含量按照GB 5009.3—2016中的直接干燥法<sup>[20]</sup>测定,灰分含量按照GB 5009.4—2016

中的高温灼烧法<sup>[21]</sup>测定,脂肪含量按照 GB 5009.6—2016 中的索氏提取法<sup>[22]</sup>测定,蛋白质含量按照 GB 5009.5—2016 中的凯氏定氮法<sup>[23]</sup>测定,淀粉含量按照 GB 5009.9—2023 中的酶水解法<sup>[24]</sup>测定,膳食纤维含量按照 GB 5009.88—2023 中的酶重量法<sup>[25]</sup>测定。

### 1.3 麦麸可溶性膳食纤维(SDF)的制备

#### 1.3.1 未发酵麦麸 SDF 的制备

未发酵麦麸 SDF 的制备参考陈家俊<sup>[26]</sup>的制备方法略有改动。将麦麸粉末以料液比 1:15 混匀, pH 调至 6.0,加入 0.5%  $\alpha$ -淀粉酶,95 °C 水浴 30 min;冷却至室温,再次调节 pH 至 6.0,并加入 5% 木瓜蛋白酶,60 °C 水浴 120 min;结束后灭酶 10 min,4000 r/min 离心 10 min,合并 3 次上清液,真空浓缩,用 95% 乙醇溶液醇沉过夜,离心的醇沉物经过冷冻干燥后为未发酵麦麸可溶性膳食纤维(W-SDF)。

#### 1.3.2 发酵后麦麸 SDF 的制备

棘孢木霉菌种的活化:将保存的棘孢木霉菌种恢复室温;PDA 培养基 121 °C 蒸汽灭菌 30 min,倒平板冷却,接种,28 °C 培养,挑选培养基长势优良的菌落,其含孢量为  $1.35 \times 10^{10}$  CFU/g,菌落日增长量达到 3 cm 左右,再次接种于新的 PDA 培养基上,重复以上操作,得到生长良好的菌落。

棘孢木霉种子液的制备:PDB 培养基 121 °C 灭菌 30 min,取菌种活化后长势良好的棘孢木霉培养,转接,用已灭菌的 9 mm 打孔器挖取一块长满棘孢木霉的 PDA 培养基,接种于 PDB 培养基中,转接完成后放入 28 °C、150 r/min 摇床中振荡培养 3 d。

参考陈家俊<sup>[26]</sup>的制备方法,将麦麸粉末以料液比 1:15 混匀,121 °C 高温灭菌 30 min,接种一定量的棘孢木霉种子液,在 28 °C、150 r/min 摇床中振荡培养,发酵好后取出,参照 1.3.1 中步骤制备发酵后麦麸可溶性膳食纤维(F-SDF)。

$$R = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为麦麸 SDF 的质量, $m_0$ 为麦麸的质量, $R$ 为 SDF 的得率。

### 1.4 棘孢木霉发酵麦麸 SDF 工艺条件优化

#### 1.4.1 单因素实验

选择发酵过程中初始 pH、发酵时间、种子液接种量及发酵料液比 4 个因素作为自变量,以麦麸 SDF 得率作为影响指标,每个因素设置 3 组平行实验。

初始 pH 优化:制备麦麸培养基,将初始 pH 调

节为 4.5、5.5、6.5、7.5、8.5,接种 9% 棘孢木霉种子液,在 28 °C、150 r/min 摇床中振荡发酵 48 h,取出后制备 F-SDF。

发酵时间优化:10 g 麦麸粉末料液比为 1:15, pH 6.5,接种 9% 棘孢木霉种子液,在 28 °C、150 r/min 摇床中分别振荡发酵 12、24、48、60、72 h,取出后制备 F-SDF。

接种量优化:按照 1.3.2 的方法制备麦麸培养基,分别接种 3%、6%、9%、12%、15% 的棘孢木霉种子液,在 28 °C、150 r/min 摇床中分别振荡发酵 48 h,取出后制备 F-SDF。

料液比优化:配制麦麸发酵培养基,按照料液比为 1:10、1:15、1:20、1:25、1:30 加入蒸馏水,接种 9% 棘孢木霉种子液,在 28 °C、150 r/min 摇床中振荡发酵 48 h,取出后制备 F-SDF。

#### 1.4.2 响应面实验设计

根据单因素实验的结果,按照 Box-behnken 实验的设计原则,选择对麦麸 SDF 得率影响显著的因素,并确定各因素的实验范围。

### 1.5 发酵前后麦麸 SDF 的纯度检测

#### 1.5.1 总糖含量的测定

采用苯酚硫酸法<sup>[27]</sup>测定总糖含量。分别取 0.1 mg/mL 葡萄糖标准品溶液 0、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL 置于试管中,用蒸馏水补充到 1.00 mL。加入 6% 苯酚溶液 1.00 mL 和浓硫酸 5.00 mL,混合摇匀,测定 490 nm 处吸光度,配制 0.10 mg/mL 样品溶液,重复上述步骤,测定吸光度并计算总糖含量。

#### 1.5.2 还原糖含量的测定

采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法<sup>[28]</sup>测定还原糖含量。分别取 1 mg/mL 葡萄糖溶液 0、0.08、0.16、0.24、0.32、0.4、0.48 mL 置于试管中,用蒸馏水补充至 0.8 mL,加入 DNS 试剂,混匀,沸水浴反应 5 min,冷水浴冷却至室温,测定 540 nm 处吸光度,配制 0.10 mg/mL 样品溶液,重复上述步骤,测定吸光度并计算还原糖含量。

### 1.6 发酵过程中棘孢木霉产纤维素酶活力测定

#### 1.6.1 滤纸酶活力(FPA)的测定

按照行业标准 QB 2583—2003<sup>[29]</sup>的方法测定,绘制葡萄糖标准曲线。将干燥处理后的滤纸条折成 M 型放入试管底部,分别加入 1.5 mL 柠檬酸缓冲液;实验组加入粗酶液 0.5 mL,确保浸没滤纸,50 °C 水浴 60 min,冷却至室温,加入 DNS 试剂 3 mL,空白管单独加入粗酶液 0.5 mL;煮沸,冷却定容至 25 mL,混匀,以空白管调零,测定 540 nm 处各管吸光度,代入标准曲线计算还原糖含量。每毫升酶

液在 50 °C、pH 4.8 条件下酶解反应 1 min 产生 1 μg 葡萄糖所需酶量定义为 1 个酶活力单位，计算公式为

$$X = m \times \frac{1}{0.5} \times N \quad (2)$$

式中：X 为酶活力，U/mL；m 为吸光度在标准曲线上对应的还原糖含量，mg；1/0.5 为换算成酶液 1 mL；N 为粗酶液的稀释倍数。

### 1.6.2 羧甲基纤维素酶活力 (CMCase) 的测定

按照行业标准 QB 2583—2003<sup>[29]</sup>中的测定方法测定棘孢木霉发酵麦麸过程中羧甲基纤维素酶活力，准备 25 mL 试管 4 支，标记为 3 个平行实验组及 1 个对照组，向各管中加入羧甲基纤维素钠溶液 2 mL，在实验组中加入粗酶液 0.5 mL，把 4 支试管放入 50 °C 水浴锅中水浴 30 min，测定还原糖含量，计算公式为

$$X = m \times \frac{1}{0.5} \times N \times 2 \quad (3)$$

式中：2 为时间换算系数。

### 1.6.3 β-葡萄糖苷酶活力 (β-Gase) 的测定

按照行业标准 QB 2583—2003<sup>[29]</sup>中的测定方法测定棘孢木霉发酵麦麸过程中的 β-葡萄糖苷酶活力，将 1.6.2 操作步骤中的羧甲基纤维素钠溶液替换为水杨苷溶液，按照式 (3) 计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 麦麸基本成分分析

麦麸成分见表 1。麦麸中含有大量的膳食纤维

成分，而其中大部分是不溶性膳食纤维，SDF 仅占 (6.25±0.52) %，因此为了更好的利用麦麸资源，对其进行必要的改性以增加 SDF 含量是必要的，此外麦麸中淀粉和蛋白质含量比较高，在制备膳食纤维过程时需要将其去除。

表 1 麦麸成分

Tab. 1 Wheat bran composition

成分	含量/%	成分	含量/%
水分	7.23±0.26	脂肪	3.66±0.21
灰分	5.82±0.31	总膳食纤维	48.59±2.06
淀粉	19.65±0.81	IDF	42.55±1.54
蛋白质	15.10±0.66	SDF	6.25±0.52

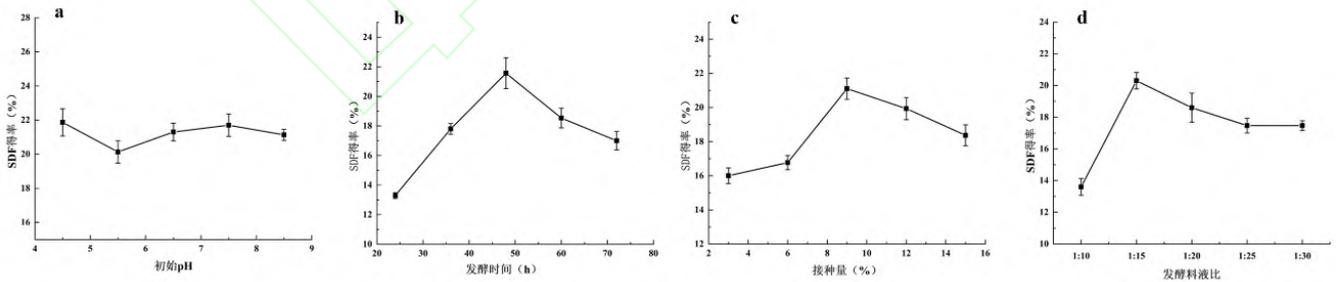
### 2.2 发酵工艺优化

#### 2.2.1 单因素实验分析

不同因素对 SDF 得率的影响如图 1 所示。

初始 pH 对于得率的影响不大，而方差分析表明，初始 pH 的 P 为 0.486>0.05，即此因素对得率没有显著影响，因此之后实验选择得率较高时的 pH 6.5。

麦麸 SDF 得率随着发酵时间的延长呈现先升高后降低，发酵时间 48 h 时，麦麸 SDF 得率最高。方差分析表明，P 为 0.002<0.01，表明发酵时间对麦麸 SDF 得率具有显著性影响。一方面可能是随着时间的延长棘孢木霉产酶量也从低到高再逐渐降低所致，另一方面可能是发酵中棘孢木霉生长旺盛，利用 SDF 造成得率再次下降。



a:初始 pH; b:发酵时间; c:接种量; d:发酵料液比

图 1 不同因素对 SDF 得率的影响

Fig. 1 Effects of different factors on the yield of SDF

在接种量不断增加下，麦麸 SDF 得率先升高后降低，在接种量 9% 时得率最高。方差分析表明，P 为 0.011<0.05，表明接种量对得率影响显著。产生这种现象的原因可能是当接种量较少时，菌丝体数

量过少，生长缓慢，产酶量较低，对 IDF 分解较少，SDF 得率低；而当接种量继续扩大时，菌体浓度过大，可能会导致发酵后期营养不足，生长减缓，产酶减少，抑或是菌体生长过于旺盛，再次利用分解

的 SDF, 造成得率下降。

随着料液比的增大, 麦麸 SDF 得率先升高后降低。木霉菌的生长繁殖和产酶都需要适宜的水分, 在水分含量较低时木霉生长较慢, 产酶少, 但水分过多会造成养分浓度低及氧气不足, 也不利于生长产酶。料液比在 1:15 时, 麦麸 SDF 得率最高。料液比该对 SDF 得率有显著性影响 ( $P<0.01$ )。

### 2.2.2 预测模型和统计分析

以发酵后麦麸 SDF 得率 ( $Y$ ) 作为响应指标, 采用 Box- Behnken 实验对接种量 ( $A$ )、发酵时间 ( $B$ )、料液比 ( $C$ ) 进行优化, 实验设计及结果见表 2, 方差分析见表 3。

表 2 Box- Behnken 设计及结果

Tab. 2 Design and test results of Box-Behnken

实验号	A/%	B/h	C	Y/%
1	9	48	1:15	24.45
2	9	36	1:10	19.67
3	9	48	1:15	23.67
4	12	48	1:10	21.70
5	6	36	1:15	16.72
6	9	36	1:20	17.54
7	12	36	1:15	19.13
8	9	48	1:15	24.78
9	6	60	1:15	14.83
10	6	48	1:10	17.46
11	9	60	1:20	16.97
12	6	48	1:20	18.02
13	9	48	1:15	24.01
14	12	48	1:20	18.50
15	9	48	1:15	23.87
16	12	60	1:15	16.21
17	9	60	1:10	15.82

二次回归方程为  $Y=7.651A+2.714B+2.493C-0.007AB-0.062AC+0.013BC-0.334A^2-0.031B^2+0.089C^2-92.725$ 。对于公式中一次项系数都为正数, 说明随着接种量、发酵时间、料液比的增加, SDF 得率呈线性增加。在交互项中, 只有  $A$  和  $B$  因素为负值 (正值代表协同效应), 说明二者同时增加对 SDF 得率产生拮抗作用。平方项只有  $C$  项系数为正数, 响应面图在  $C$  的方向上开口向上,  $A$ 、 $B$  的响应面与在其方向上开口向下。

由表 3 可知, 此回归模型  $F=111.36$ ,  $P<0.0001$  说明该模型显著, 在一次项中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的  $P<0.05$ ,

说明 3 个因素对于响应值具有显著性影响, 通过比较三者的  $F$  值可知, 对 SDF 得率的影响为  $B$  (发酵时间)  $>A$  (接种量)  $>C$  (料液比)。在二次交互项中,  $AC$  项、 $BC$  项  $P<0.01$ , 说明接种量和料液比、发酵时间与料液比的交互作用对于 SDF 得率的交互作用极其显著。

失拟项  $P>0.05$ , 表明该模型实验不拟合度几率低。决定系数  $R^2=0.9931$ ,  $R^2_{Adj}=0.9841$ ,  $R^2_{pred}=0.9525$ ,  $(R^2_{Adj}-R^2_{pred})<0.2$ , 表明此模型对实际实验方法拟合度和预测性都较好, 因此该回归模型对于实验结果具有良好的拟合效果。

表 3 方差分析

Tab. 3 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	$P$	显著性
模型	184.22	9	20.47	111.36	<0.0001	**
A	9.05	1	9.05	49.25	0.0002	**
B	10.65	1	10.65	57.93	0.0001	**
C	1.64	1	1.64	8.91	0.0204	*
AB	0.2652	1	0.27	1.44	0.2687	—
AC	3.53	1	3.53	19.23	0.0032	**
BC	2.69	1	2.69	14.63	0.0065	**
A <sup>2</sup>	38.07	1	38.07	207.09	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	82.51	1	82.51	448.88	<0.0001	**
C <sup>2</sup>	20.92	1	20.92	113.84	<0.0001	**
残差	1.29	7	0.18			
失拟	0.4716	3	0.16	0.77	0.57	—
纯误差	0.8151	4	0.20			
总计	185.51	16				

注: \*为差异显著 ( $P<0.05$ ); \*\*为差异极显著 ( $P<0.01$ ); —为无显著性 ( $P>0.05$ )。

不同因素交互作用对 SDF 得率影响如图 2 所示。由图 2 (a) 可知, 当发酵时间不变时, 提高棘孢木霉的接种量, SDF 的得率先上升后又下降, 而当固定接种量时, 延长发酵时间, SDF 的得率变化也呈先上升后下降, 响应曲面中部呈凸起状, 等高线呈椭圆形状, 结合方差分析结果, 表明接种量与发酵时间之间具有交互作用, 但不显著 ( $P>0.05$ )。将图 2 (a) 和图 2 (b) 对比可以看出, 相较于图 2 (a) 中响应曲面, 图 2 (b) 中曲面弯曲程度更明显, 等高线更椭圆, 结合方差分析可知接种量与料液比的交互作用明显, 具有极为显著的影响 ( $P<0.01$ )。根据图 2 (c) 可以看出, 发酵时间与料液比交互的响应曲面弯曲程度高, 等高线呈现明显椭圆形, 结合方差分析表明两因素之间的交互作

用明显。

根据模型推荐的工艺参数（接种量 11.79%、发酵时间 45.74 h、料液比 1 : 13.34）调整实验条件为接种量 11.80%、发酵时间 46 h、料液比 1 : 13.30，进行验证实验，重复 3 次，测得 SDF 得率为  $(22.38 \pm 0.32)\%$ ，接近预测值 22.89%，为未发酵麦麸 SDF 得率  $(6.25 \pm 0.52\%)$  的 3.58 倍，表明该模型拟合良好，具有实际应用价值。

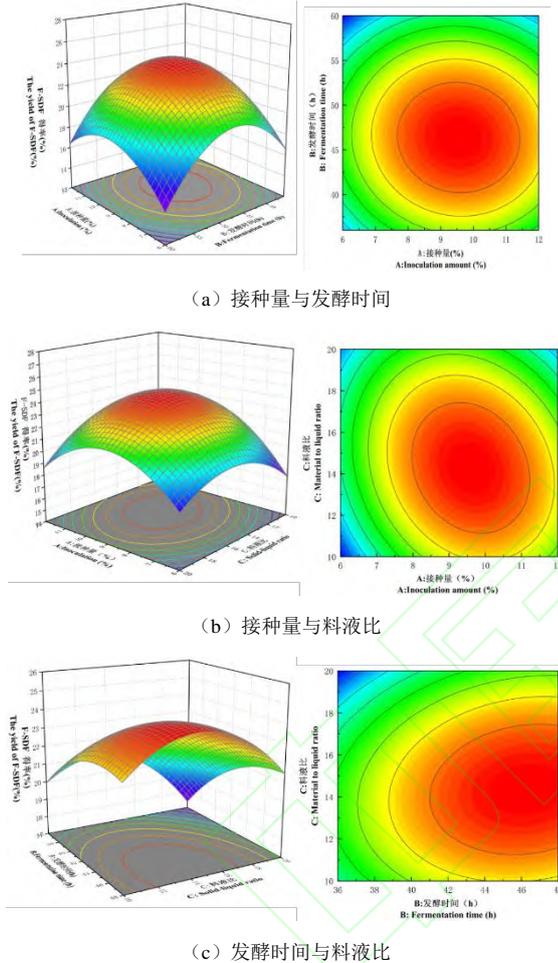


图 2 不同因素交互作用对 SDF 得率影响

Fig. 2 Effect of interaction of different factors on SDF yield

### 2.3 发酵前后 SDF 纯度测定

#### 2.3.1 总糖含量的测定

采用苯酚硫酸法测定 W-SDF 与 F-SDF 的总糖含量，葡萄糖标准曲线（图 3）为  $y=11.489x+0.0126$ ，将 W-SDF 与 F-SDF 配制成溶液测定，W-SDF 的总糖含量为  $(78.69 \pm 1.24)\%$ ，F-SDF 的总糖含量为  $(88.78 \pm 1.21)\%$ 。产生此现象的原因是发酵过程中提高 FPA、CMCase、 $\beta$ -Gase 酶活力，进而切割麦麸膳食纤维的不同糖苷键，暴露更多亲水基团，将

部分膳食纤维水解为单糖，促进膳食纤维的溶解。

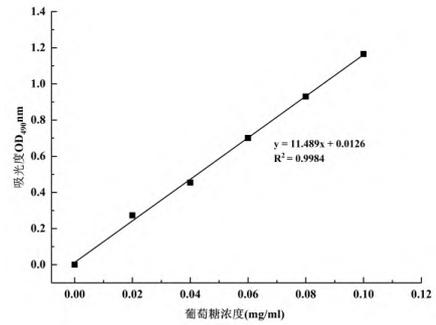


图 3 总糖含量测定标准曲线

Fig. 3 Standard curve of total sugar content

#### 2.3.2 还原糖含量的测定

采用 DNS 法测定 W-SDF 与 F-SDF 的还原糖含量，葡萄糖标准曲线（图 4）为  $y=1.5975x+0.0962$ ，将 W-SDF 与 F-SDF 配制成溶液测定，得 W-SDF 的还原糖含量为  $(6.72 \pm 0.26)\%$ ，F-SDF 的还原糖含量为  $(7.12 \pm 0.12)\%$ 。

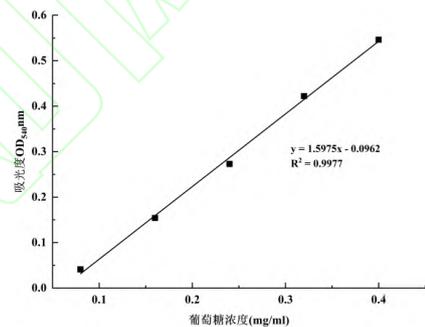


图 4 还原糖含量测定标准曲线

Fig. 4 Standard curve of reducing sugar content

### 2.4 发酵过程中棘孢木霉产纤维素酶活力的测定

葡萄糖标准曲线（图 5）为  $y=0.3041x-0.0164$ ，线性系数  $R^2=0.9998$ ，符合使用要求。在许锡凯<sup>[30]</sup>、司靖宇<sup>[31]</sup>的研究中，发酵菌株产纤维素酶活力与 SDF 得率之间具有紧密联系，因此测定发酵麦麸过程中棘孢木霉产酶情况，可以更好地说明棘孢木霉发酵与 SDF 得率的关系。棘孢木霉发酵麦麸过程中的酶活力变化结果如图 6 所示。

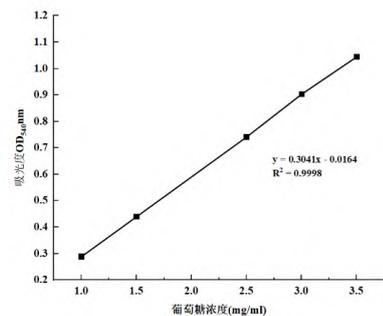
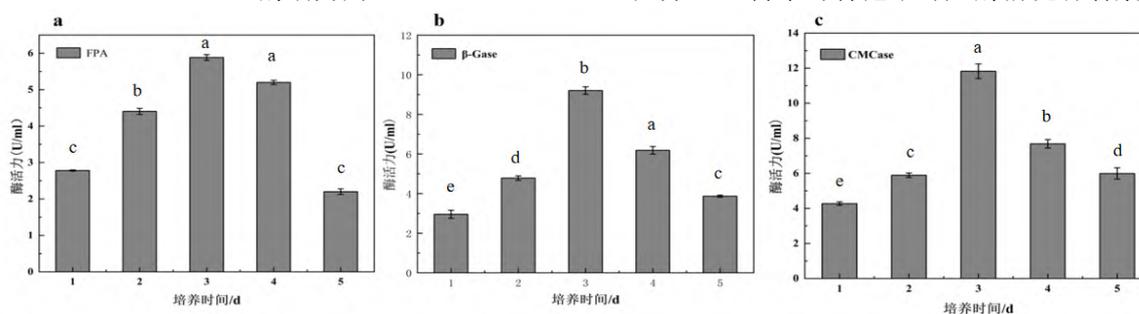


图 5 葡萄糖标准曲线

Fig. 5 Glucose standard curve

棘孢木霉产酶量呈先上升再下降的趋势, 在发酵 3 d 时均达到最高值, 其中 FPA 酶活力为  $(5.88 \pm 0.08) \text{ U/mL}$ , CMCCase 酶活力为  $(11.83 \pm 0.42)$

$\text{U/mL}$ ,  $\beta\text{-Gase}$  酶活力为  $(9.17 \pm 0.18) \text{ U/mL}$ 。这与麦麸发酵过程中, SDF 得率先上升再降低的趋势一致, 表明 SDF 得率与棘孢木霉产酶情况有着紧密关联。



(a: FPA 酶活; b:  $\beta\text{-Gase}$  酶活; c: CMCCase 酶活) 不同字母代表组间差异具有显著性 ( $P < 0.05$ )

图 6 棘孢木霉发酵麦麸过程中的酶活力变化

Fig. 6 Changes of cellulase activity during the fermentation of wheat bran with *Trichoderma asperellum*

### 3 结 语

为提高麦麸中 SDF 的含量, 采用棘孢木霉发酵麦麸, 经过单因素实验和响应面分析得到棘孢木霉发酵麦麸提高 SDF 含量的最佳工艺, 结果表明: 在棘孢木霉接种量 11.80%、发酵时间 46 h、料液比 1 : 13.30 的条件下, 经发酵后, 麦麸 SDF 得率由  $(6.25 \pm 0.52) \%$  提高至  $(22.38 \pm 0.32) \%$ 。总糖含量从  $(78.69 \pm 1.24) \%$  (W-SDF) 提高到  $(88.78 \pm 1.21) \%$  (F-SDF)。发酵后棘孢木霉的产酶活力增加, 表明棘孢木霉发酵麦麸显著提高麦麸 SDF 的得率, 并初步探究其发酵前后酶活的变化, 证实本课题组前期筛选到一株新菌棘孢木霉 (*Trichoderma asperellum*) 具有良好的产纤维素酶能力, 相比于解淀粉芽孢杆菌的葡甘聚糖酶用于提高麦麸中 SDF, 棘孢木霉通过 FPA、 $\beta\text{-Gase}$ 、CMCCase 对麦麸中膳食纤维进行改性, 为麦麸的高价值开发利用提供了思路和理论依据。

### 参考文献:

[1] 洪宇, 孙辉, 常柳, 等. 2020 年我国小麦品质分析[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(1): 87-92.  
 [2] 李建科, 孟永宏, 刘柳, 等. 我国食品工业副产物资源化利用现状[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 1-13.  
 [3] APPRICH S, TIRPANALAN Ö, HELL J, et al. Wheat bran-based biorefinery 2 : valorization of products[J]. LWT - Food science and technology, 2014, 56(2): 222-231.  
 [4] BERKAS S, CAM M. Effects of acid, alkaline and enzymatic extraction methods on functional, structural

and antioxidant properties of dietary fiber fractions from quince (*Cydonia oblonga* Miller) [J]. Food chemistry, 2025, 464: 141596.

[5] LI X, WANG L, TAN B, et al. Effect of structural characteristics on the physicochemical properties and functional activities of dietary fiber: a review of structure-activity relationship[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024: 132214.  
 [6] 许锐. 酶改性麦麸及其在高膳食纤维面条制作中的应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.  
 [7] 谢贵各, 桑振亮, 冯桂宝, 等. 利用菊粉与改性麦麸制作高膳食纤维营养饼干的研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(6): 96-102.  
 [8] 罗威, 梁海娣, 李想. 紫薯麦麸软欧包的研制及品质分析[J]. 美食研究, 2022, 39(1): 60-66.  
 [9] 王丽, 康晶晶. 发酵技术在膳食纤维改性中的应用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 400-409.  
 [10] GAN J, XIE L, PENG G, et al. Systematic review on modification methods of dietary fiber[J]. Food hydrocolloids, 2021, 119: 106872.  
 [11] 许方舟. 赤豆蒸煮液膳食纤维的提取、功能性质及应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.  
 [12] 段伟伟. 纤维素酶在饲用膳食纤维制备中的应用进展[J]. 饲料研究, 2022, 45(17): 156-159.  
 [13] 李春冬, 徐伟良, 多拉娜, 等. 两株野生木霉的鉴定及其产漆酶和纤维素酶研究[J]. 东北农业科学, 2022, 47(5): 67-71.  
 [14] JIA M, CHEN J, LIU X, et al. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation[J]. Food hydrocolloids, 2019, 94: 468-474.

- [15] YANG C, YAO J, ZHANG T, et al. Mixed fermentation of navel orange peel by *Trichoderma viride* and *Aspergillus niger*: effects on the structural and functional properties of soluble dietary fiber[J]. *Food bioscience*, 2024, 57: 103545.
- [16] 范莉莉, 姬佳铭, 荀月凤, 等. 一株产漆酶的棘孢木霉 Tasjk26 分离及酶活特性研究[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1-11[2025-05-31]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040689>.
- [17] 刘和. 棘孢木霉内切几丁质酶 42 基因表达调控与工程菌株构建[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [18] 陈守菊. 棘孢木霉漆酶基因 *lac3* 的克隆表达及酶学性质研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2015.
- [19] 王珊珊, 万博文, 王皓郁, 等. 棘孢木霉降解纤维素能力评价及其对玉米秸秆的降解效果[J]. *天津科技大学学报*, 2024, 39(5): 22-30.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会和国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会和国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会和国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定: GB 5009.88—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [26] 陈家俊. 绿色木霉发酵对茶渣膳食纤维的理化性质与降血糖功能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [27] 徐志祥, 李刚, 李宝健. 苯酚-硫酸法测定灵芝多糖含量的条件研究[J]. *食用菌*, 2000(3): 6-8.
- [28] 薛丽洁. 挤压预处理对山药多糖提取、结构、体外消化和醇解的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022.
- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 纤维素酶制剂: QB2583—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [30] 许锡凯. 好食脉孢菌固态发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其功能性质[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021.
- [31] 司靖宇. 茶渣膳食纤维发酵改性菌株的筛选及其对膳食纤维改性和结合多酚释放的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.