陈林林, 张铭, 李伟, 等. 米糠源阿魏酰低聚糖的混菌发酵制备及生物活性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 107−117. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070107

CHEN Linlin, ZHANG Ming, LI Wei, et al. Preparation and Biological Activity of Feruloylated Oligosaccharides from Rice Bran by Mixed Strain Fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 107−117. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070107

· 研究与探讨 ·

米糠源阿魏酰低聚糖的混菌发酵制备及生物活性研究

陈林林*, 张　铭, 李　伟, 周英杰, 于　笑, 梁　栋, 张　娜*

（哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028）

摘　要: 为探究米糠阿魏酰低聚糖（feruloyl oligosaccharides，FOs）的高效制备方法及其生物活性，本研究以米糠为原料，采用植物乳杆菌与地衣芽孢杆菌混菌发酵法制备 FOs，优化发酵条件并对 FOs 进行结构表征及生物活性分析。结果表明，最佳发酵条件为：接种比例 3∶7、接种量 1×10^8 CFU/mL、料液比 1∶3（g/mL）、发酵 3 d，此条件下 FOs 含量达 64.9 μmol/L。通过扫描电镜、紫外、红外光谱及液质联用等方法对发酵米糠及 FOs 进行结构分析，结果表明：混菌发酵破坏了米糠的细胞壁结构，制备的 FOs 为阿魏酰基酯化修饰的低聚糖，主要成分为阿魏酰阿拉伯低聚木二糖、木四糖和木五糖。在 10 mg/mL 质量浓度下，FOs 对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率分别达 58.34% 和 95.70%，可显著降低大米淀粉水解率（$P<0.05$），水解率降低了 6.39%；在 1 mg/mL 质量浓度下，FOs 对 DPPH 和 $ABTS^+$ 自由基清除率分别为 78.15% 和 87.80%，并能抑制晚期糖基化终末产物（AGEs）生成，抑制率为 75.45%。本研究为 FOs 的绿色制备及米糠资源高效利用提供了理论依据。

关键词: 米糠, 阿魏酰低聚糖, 混菌发酵, 生物活性, 抗氧化活性

中图分类号: TS205.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0107−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070107　　本文网刊:

Preparation and Biological Activity of Feruloylated Oligosaccharides from Rice Bran by Mixed Strain Fermentation

CHEN Linlin*, **ZHANG Ming**, **LI Wei**, **ZHOU Yingjie**, **YU Xiao**, **LIANG Dong**, **ZHANG Na***

（College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China）

Abstract: To explore the efficient preparation method and biological activities of feruloyl oligosaccharides (FOs) from rice bran, FOs were prepared by mixed fermentation of *Lactobacillus plantarum* and *Bacillus licheniformis* using rice bran as raw material. The fermentation conditions were optimized and the structure and biological activities of FOs were analyzed. The results showed that the optimal fermentation conditions were inoculation ratio of 3∶7, inoculation amount of 1×10^8 CFU/mL, solid-liquid ratio of 1:3 (g/mL), and fermentation for 3 days. Under these conditions, the content of FOs reached 64.9 μmol/L. The structure of fermented rice bran and FOs was analyzed by scanning electron microscopy, ultraviolet, infrared spectroscopy and liquid chromatography-mass spectrometry. The results showed that the mixed fermentation destroyed the cell wall structure of rice bran, and the prepared FOs were feruloyl esterified oligosaccharides, mainly composed of feruloylated arabinooligosaccharides, xylo-tetraose and xylo-pentaose. At the concentration of 10 mg/mL, the inhibitory rates of FOs on α-amylase and α-glucosidase were 58.34% and 95.70%, respectively, which could significantly reduce the hydrolysis rate of rice starch ($P<0.05$), with a reduction of 6.39%. At the concentration of 1 mg/mL, the scavenging rates of DPPH and $ABTS^+$ free radicals were 78.15% and 87.80%, respectively, and FOs could inhibit the formation

收稿日期: 2025−07−10

基金项目: 国家重点研发计划项目（2023YFD2100803）; 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目（2023-KYYWF-1054）; 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项（2021ZX12BO7-1）。

作者简介/通信作者*: 陈林林（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物催化与转化, E-mail: chenlinl2013@126.com。

*** 通信作者:** 张娜（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 谷物化学, E-mail: foodzhangna@163.com。

of advanced glycation end products (AGEs) with an inhibition rate of 75.45%. This study provides a theoretical basis for the green preparation of FOs and the efficient utilization of rice bran resources.

Key words: rice bran; feruloyl oligosaccharides; mixed culture fermentation; biological activity; antioxidant activity

阿魏酰低聚糖(feruloyl oligosaccharides, FOs)是一类由阿魏酸(ferulic acid, FA)羧基与低聚糖羟基通过酯键共价连接形成的功能性衍生物[1],其聚合度因来源原料和制备方法不同而常见于 2~8 之间,该结构兼具疏水性阿魏酰基和亲水性低聚糖基团,赋予其多种生理功能。相较于低聚木糖,FOs 不仅保留了选择性促进肠道有益菌增殖、改善肠道微生态的核心益生元功能,更因阿魏酸的存在而赋予其抗氧化、抗炎、潜在抗肿瘤及增强免疫调节等多重生物活性,实现了生物功能的协同增效[2]。相较于游离阿魏酸单体,其与低聚糖的结合显著提高了阿魏酸的水溶性、稳定性以及在消化道的靶向递送效率,使其更易被肠道菌群代谢利用,逐步释放活性物质并发挥更持久的健康效益,在保健食品和医药领域应用前景广阔[3]。

谷物麸皮是制备 FOs 的重要原料,米糠是稻米加工的主要副产物,含有丰富的 FOs 前体物质-阿拉伯木聚糖。在米糠来源的阿拉伯木聚糖结构中,FA 通过酯键密集交联在阿拉伯木聚糖主链的阿拉伯糖残基上,形成高度分支化、水不溶性的大分子网络结构[4],限制了 FOs 的生物可及性。因此如何从米糠中高效、温和、经济地提取 FOs 是一个关键问题。传统物理、化学水解法虽然可以断裂糖苷键与酯键,但存在操作繁琐、得率低、副产物多及结构被破坏等不足[5]。酶解法虽然条件温和、特异性高,但成本高且单一酶效率不足,需复合酶系协同作用[6]。相比之下,微生物发酵技术展现出更高效率和经济性[7],避免传统酶解法所需的酶制剂分离及不溶性膳食纤维制备步骤[8],还可以富集产物并生成新活性物质[9]。例如,出芽短梗霉发酵麦麸可使 FOs 产量达 37.47 μmol/L[10],香菇液体发酵米糠优化后 FOs 产量达 0.86 mmol/L[11],而好食脉孢霉固态发酵玉米麸皮经工艺优化后 FOs 产量提升 60.83%[12]。通过混菌发酵,微生物分泌的多种酶能够协同作用,进一步提高酶解效率和 FOs 的产量[13]。如酵母菌 Y5 产蛋白酶及淀粉酶,Y9 则高产纤维素酶及木聚糖酶,二者混菌发酵可实现对原料中多种组分的同步降解[14]。段元霄等[15] 使用酿酒酵母和枯草芽孢杆菌混菌发酵小麦麸皮时,FOs 产量最高达 0.059 mmol/g,高于部分单菌发酵。然而目前以米糠为基质,采用混菌发酵法制备 FOs 的研究较少,仍有较大的探索空间。

本文通过植物乳杆菌和地衣芽孢杆菌混菌发酵米糠制备 FOs,测定发酵过程中的酶活力变化,以明确其对 FOs 释放的影响,同时对 FOs 的结构进行表征并分析其生物活性,进一步揭示其在抑制消化酶活性、抑制大米淀粉消化、抗糖基化、抗氧化等方面的作用,为米糠 FOs 的高效制备及其在功能性食品中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

米糠、大米　黑龙江五常金禾米业有限公司;大米淀粉　采用碱法从大米中进行提取;植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)ATCC8014、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)ATCC11946　上海鲁微科技有限公司;Amberlite XAD-2 大孔树脂　日本三菱化工公司;木聚糖、可溶性淀粉、α-淀粉酶(猪胰)(8 U/mg)、α-葡萄糖苷酶(700000 U/mL)、牛血清蛋白　上海源叶生物科技有限公司;其他所用试剂均为分析纯。

JDX-200 气浴摇床　上海世平实验设备有限公司;UV-2550 紫外-可见分光光度计　岛津仪器公司;Spectrum Two 红外光谱仪　美国 PerkinElmer 公司;F-7000 荧光光谱仪、S-3400N 型扫描电子显微镜　日本 Hitachi 公司;MALDISYNAPT MS-超高效液相色谱四级杆飞行时间串联质谱联用仪　美国 Waters 公司。

1.2 实验方法

1.2.1　米糠固态发酵制备 FOs

1.2.1.1　菌种的活化和培养　分别在 MRS 和 LB 培养基中接种植物乳杆菌菌粉和地衣芽孢杆菌菌粉。37 ℃ 恒温振荡培养至活菌数均≥10^9 CFU/mL(经 2~3 代活化复壮)。4 ℃、6000 r/min 离心 10 min,保留菌体沉淀。用 0.9% 无菌生理盐水重悬菌体,同条件离心洗涤 3 次,最后一次洗涤后,向沉淀中加入 30 mL 生理盐水,充分混匀后备用。

1.2.1.2　米糠固态发酵　参考董丽红等[16] 的方法,略作修改。按 v∶w=3∶1 的比例向米糠原料中加入正己烷,25 ℃ 下恒温脱脂 30 min,室温环境中风干,得脱脂米糠。脱脂米糠过 50 目筛,置于锥形瓶中,121 ℃ 下灭菌 20 min,待冷却后接种植物乳杆菌以及地衣芽孢杆菌菌液,在 37 ℃ 的恒温培养箱内进行固态发酵。

1.2.1.3　混菌发酵制备 FOs 优化　米糠用量为 20 g,发酵液 pH7.0,37 ℃ 恒温条件下发酵,以 FOs 含量为指标进行因素优化,研究混菌比例、料液比、接种比例及发酵时间对混菌发酵米糠制备 FOs 含量的影响。保持接种量 1×10^7 CFU/mL,料液比 1∶2 g/mL,发酵时间 3 d,植物乳杆菌与地衣芽孢杆菌接种比例 1∶9、3∶7、5∶5、7∶3、9∶1,确定接种比例;保持接种比例 3∶7,料液比 1∶2 g/mL,发酵时间 3 d,接种量 1×10^4、1×10^5、1×10^6、1×10^7、1×10^8、1×10^9 CFU/mL,确

定接种量；保持接种比例 3∶7，接种量 1×10^8 CFU/mL，发酵时间 3 d，料液比 1∶1、1∶2、1∶3、1∶4、1∶5 g/mL，确定料液比；保持接种比例 3∶7，接种量 1×10^8 CFU/mL，料液比 1∶3 g/mL，发酵时间 1、2、3、4、5、6、7 d，确定发酵时间。

1.2.1.4　单菌发酵米糠制备 FOs　米糠用量为 20 g，pH7.0，37 ℃ 恒温条件下发酵。植物乳杆菌：接种量 1×10^6 CFU/mL，料液比 1∶3 g/mL，发酵 4 d；地衣芽孢杆菌：接种量 1×10^7 CFU/mL，料液比 1∶2 g/mL，发酵 3 d。

1.2.1.5　FOs 含量测定　参考肖凯等[12]的方法，略作修改。发酵米糠湿样经 50 ℃ 干燥 24 h 后粉碎，加入去离子水 1∶10(w/v)，80 ℃ 水浴 30 min，4 ℃、5000 r/min 离心 10 min，保留上清液，FOs 含量采用双波长分光光度法测定。

阿魏酸的摩尔吸光系数(L·mol^{-1}·cm^{-1})：ε'_{345}=19662，ε'_{375}=7630；FOs 摩尔吸光系数(L·mol^{-1}·cm^{-1})：ε_{345}=23064，ε_{375}=31430。FOs 含量按式(1)进行计算：

$$C=\frac{(\varepsilon'_{345}\times A_{375}-\varepsilon'_{375}\times A_{345})\times b}{\varepsilon'_{345}\times\varepsilon_{375}-\varepsilon_{345}\times\varepsilon'_{375}}\qquad 式(1)$$

式中：b 为比色皿的厚度，1 cm；C 为阿魏酸低聚糖的含量，mol/L；A_{345} 为 345 nm 波长下的吸光度，A_{375} 为 375 nm 波长下的吸光度。

1.2.2　发酵过程中酶活性的测定

1.2.2.1　粗酶液的制备　参考 El-SHISHTAWY 等[17]的方法，略作修改。于最优条件下制备 FOs，发酵培养 7 d，每 24 h 取样。样品经冷冻干燥 24 h 后，按 1∶20(w/v)料水比与去离子水混合，摇床振荡 2 h，8000 r/min 离心 10 min，收集上清液得粗酶液。

1.2.2.2　淀粉酶活力测定　参考 KEHAROM 等[18]的方法，略作修改。取粗酶液 0.5 mL 与 1 mL 可溶性淀粉溶液(pH5.6)混合，37 ℃ 水浴 1 h，DNS 法测定生成的还原糖量，以此计算淀粉酶活力。

1.2.2.3　纤维素酶活力测定　取粗酶液 0.5 mL 与 1 mL 羧甲基纤维素钠溶液(pH4.8)混合，37 ℃ 水浴 1 h，DNS 法测定生成的还原糖量，以此计算纤维素酶活力。

1.2.2.4　蛋白酶活力测定　参考刘平等[19]的方法，略作修改。将粗酶液 0.5 mL 与 1 mL 酪蛋白溶液混合均匀，40 ℃ 水浴 10 min。加入 2 mL TCA 终止反应，继续水浴 20 min；离心取上清液 1 mL，加入 5 mL Na_2CO_3 溶液以及 0.3 mL 的福林酚溶液，在 40 ℃ 下显色，保持 30 min。冷却后在 680 nm 测定吸光度，计算蛋白酶活力。

1.2.2.5　木聚糖酶活力测定　参考 MENG 等[20]的研究方法，略作修改。取粗酶液 0.5 mL 与 1 mL 木聚糖溶液(pH5.0)混合，55 ℃ 水浴 45 min，DNS 法测定生成的还原糖量，以此计算木聚糖酶活力。

1.2.3　米糠发酵前后的结构观察与 FOs 的表征

1.2.3.1　FOs 的纯化　参考宋春艳等[21]的方法，略作修改。使用 1.2.2.1 的方法制备发酵米糠提取液，提取液中蛋白质用 Sevage 试剂去除。使用 Amberlite XAD-2 大孔树脂进行纯化：上样流速为 1 mL/min，先使用 3 倍柱体积的蒸馏水洗脱杂质，再以使用 50% 乙醇以 4 倍柱体积、1.5 mL/min 流速来解吸 FOs，旋蒸洗脱液，冻干得 FOs 固体样品。

1.2.3.2　扫描电镜　分别取未发酵米糠及混菌发酵第 1、3、5、7 d 的米糠样品，干燥后样品经离子溅射法镀金，采用扫描电子显微镜(SEM)观察表面结构。

1.2.3.3　FOs 紫外光谱表征　采用 100 mmol/L pH6.0 的 MOPS 缓冲液稀释纯化 FOs 和 FA 固体样品，在 200~400 nm 紫外波长下进行扫描。

1.2.3.4　FOs 红外光谱表征　将纯化后的 FOs 固体样品与溴化钾粉末混合，研磨压制成厚度为 1 mm 的颗粒，记录 4000~400 cm^{-1} FOs 的傅立叶变换红外光谱图。

1.2.3.5　FOs 液相色谱-质谱联用表征　液相色谱条件：色谱柱：Accucore C_{18} 柱(100 mm×2.1 mm，2.6 μm)；流动相：溶剂 A 为乙腈溶液；溶剂 B 为水溶液(0.5% 甲酸，v/v)，等度洗脱，流速 1 mL/min；柱温 25 ℃；进样量 20 μL，检测波长：325 nm；质谱条件：离子源：ESI 源，源电压 4.0 kV；正离子检测，质量扫描范围为 m/z 1000~1300；鞘气(N_2)流速：20 Arb；辅助气(N_2)流速：10 Arb；毛细管温度：300 ℃；毛细管电压：−15 V。液质联用时分流，使 150 μL/min 液体进入 ESI 源。

1.2.4　FOs 对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性抑制作用测定　参考 WANG 等[22]的方法。分别配制 2~10 mg/mL 的 FOs、FA、木糖和低聚木糖溶液。对照空白组加入 PBS 700 μL；对照组加入 PBS 300 μL、α-淀粉酶溶液(20 U/mL)400 μL；样品空白组加入 PBS 300 μL、样液 400 μL；样品组加入样液 300 μL、酶溶液 400 μL；37 ℃ 水浴反应 10 min，之后加入 300 μL 的 5% 大米淀粉溶液，继续反应 10 min。取 100 μL 反应液与 DNS 试剂混合后，在沸水浴中显色 5 min，在 540 nm 波长处测定吸光度，并根据公式(2)计算 α-淀粉酶的抑制率。

$$抑制率(\%)=\frac{(A_1-A_2)-(A_3-A_4)}{A_1-A_2}\times100\qquad 式(2)$$

式中：A_1 为对照组吸光度；A_2 为对照空白组吸光度；A_3 为样品组吸光度；A_4 为样品空白组吸光度。

对照空白组加入 pH6.8 的 PBS 800 μL；对照组加入 PBS 400 μL、α-葡萄糖苷酶溶液 1.5(U/mL)400 μL；样品空白组加入 PBS 400 μL、样液 400 μL；样品组加入样液 400 μL、酶溶液 400 μL；37 ℃ 水浴反应 5 min，之后加入 pNPG(2.5 mmol/L)400 μL，

37 ℃ 水浴反应 15 min, 最后加入 1.6 mL 的 Na_2CO_3 溶液终止反应, 在 405 nm 处测其吸光度, 对 α-葡萄糖苷酶的抑制率按式(2)计算。

1.2.5 FOs 抑制大米淀粉消化的测定 参考 WANG 等[23] 的方法, 略作修改。采用体外动态人胃肠系统进行体外消化, 模拟唾液(SSF)、模拟胃液(SGF)及模拟肠液(SIF)均依据 INFOGEST 标准化流程配制。分别配制 10 mg/mL 的 FOs、FA、木糖和低聚木糖溶液, 与等体积大米淀粉混合, 对照组为纯大米淀粉溶液。将样品与 SSF 按 1∶1 体积混合, α-淀粉酶终浓度为 75 U/mL, 维持 pH 为 7.0, 37 ℃ 振荡孵育 2 min, 模拟口腔消化。结束后加入等体积 SGF, 胃蛋白酶终浓度为 2000 U/mL, 维持 pH 为 3.0, 37 ℃ 振荡 120 min, 模拟胃消化。结束后加入等体积 SIF, 胰酶和淀粉糖苷酶的终浓度分别为 200 U/mL 和 320 U/mL, 维持 pH 为 7.0, 37 ℃ 持续振荡。不同时间取等量反应液, 加无水乙醇灭酶, DNS 法测定葡萄糖量, 淀粉水解率根据公式(3)来计算。

$$淀粉水解率(\%)=\frac{G_t\times 0.9}{TS}\times 100 \quad 式(3)$$

式中: G_t 表示不同时间内释放的葡萄糖量, mg; TS 表示样品含有总淀粉的质量, mg。

大米淀粉经 FOs 抑制消化后, 按公式(4)~(6)计算出其快速消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)的含量。

$$RSD(\%)=\frac{(G_{120}-G_0)\times 0.9}{TS}\times 100 \quad 式(4)$$

$$SDS(\%)=\frac{(G_{120}-G_{20})\times 0.9}{TS}\times 100 \quad 式(5)$$

$$RS(\%)=[TS-(RSD+SDS)]\times 100 \quad 式(6)$$

式中: G_0 表示淀粉水解前含有的葡萄糖质量, mg; G_{20} 为淀粉在 20 min 内水解释放的葡萄糖质量, mg; G_{120} 为淀粉在 120 min 内水解释放的葡萄糖质量, mg; TS 代表样品含有总淀粉的质量, mg。

FOs 抑制大米淀粉消化动力学模型为一级反应, 如公式(7)所示:

$$C_t=C_\infty(1-e^{-kt}) \quad 式(7)$$

式中: C_t 为消化时间 t(min)时大米淀粉的水解度, C_∞是反应达到终点时最终的水解度, k 是消化速率常数(min^{-1})。

1.2.6 FOs 抑制蛋白质非酶糖基化的测定 参考 JIA 等[24] 的方法, 略作修改。设空白组及 FOs、FA、木糖、低聚木糖组(0.2~1 mg/mL); 用 0.10 mol/L pH7.0 磷酸缓冲液配制 10 mg/mL 牛血清白蛋白(BSA)和 500 mmol/L 葡萄糖(Glu)溶液; 取 1 mL 样液与 1 mL BSA 溶液、1 mL Glu 溶液混合, 100 ℃ 水浴 40 min 后冰水浴冷却, 以荧光光谱仪在激发波长 337 nm、发射波长 350~550 nm 范围内测糖基化 BSA 荧光强度, 按式(8)计算 AGEs 生成抑制率。

$$抑制率(\%)=\frac{F_0-F}{F_0}\times 100 \quad 式(8)$$

式中: F_0 为 BSA-葡萄糖体系空白组的荧光强度, F 为样品组的荧光强度。

1.2.7 FOs 体外抗氧化活性的测定

1.2.7.1 DPPH 自由基清除能力测定 参考潘志涛等[25] 的方法, 略作修改。将纯化后的 FOs、FA、低聚木糖配制成 0.01~1 mg/mL 的溶液, 取样液与等体积 0.1 mmol/L DPPH-无水乙醇溶液混匀, 避光反应 30 min 并在 517 nm 处测定吸光度, A_1、A_2、A_0 分别为样液与 DPPH 混合液、样液与无水乙醇混合液、去离子水与 DPPH 混合液的吸光度, 其清除能力按公式(9)计算:

$$DPPH自由基清除率(\%)=\frac{A_0-(A_1-A_2)}{A_0}\times 100 \quad 式(9)$$

1.2.7.2 $ABTS^+$自由基清除能力测定 参考袁欣等[26] 的方法, 略作修改。将 7 mmol/L ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液 1∶1 混合, 避光静置 16 h, 稀释储备液至 734 nm 吸光值为 0.70±0.02。将纯化后的 FOs、FA、低聚木糖配制成 0.01~1 mg/mL 的溶液, 取样液与等体积 ABTS 溶液混合, 避光反应 10 min 并在 734 nm 处测定吸光度, A_1 为样液与 ABTS 混合液吸光度, A_0 为去离子水与 ABTS 混合液吸光度, 清除能力按式(10)进行计算:

$$ABTS^+自由基清除率(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100 \quad 式(10)$$

1.2.7.3 总还原能力测定 参考 MALINO 等[27] 的方法。制备 FRAP 溶液, 将纯化后的 FOs、FA、低聚木糖配制成 0.01~1 mg/mL 的溶液, 取样液与等体积 FRAP 工作液混合, 在 593 nm 波长下, 避光反应 10 min, 测定各混合液的吸光值 A。吸光值的大小反映样液的总还原能力, 吸光值越大, 表示总还原能力越强。

1.3 数据处理

所有实验重复进行 3 次, 数据结果以平均值±标准差表示; 使用 SPSS 27.0 软件对实验数据进行处理, 通过 LSD 法进行显著性分析, 显著性水平 $P<0.05$; 利用 Origin 2022 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 混菌发酵制备 FOs 的优化条件

由图 1 可知, 植物乳杆菌与地衣芽孢杆菌以 3∶7 比例混菌发酵时, FOs 含量达最高为 53.4 μmol/L, 两菌种协同作用通过分泌互补酶系显著提升底物利用率, 共同释放可发酵底物。接种量为 1×10^8 CFU/mL 时, FOs 含量达到峰值 57.5 μmol/L, 超过该接种量可能会因营养竞争和代谢副产物积累导致 FOs 产量下降。FOs 含量在料液比 1∶3 g/mL 时最高达

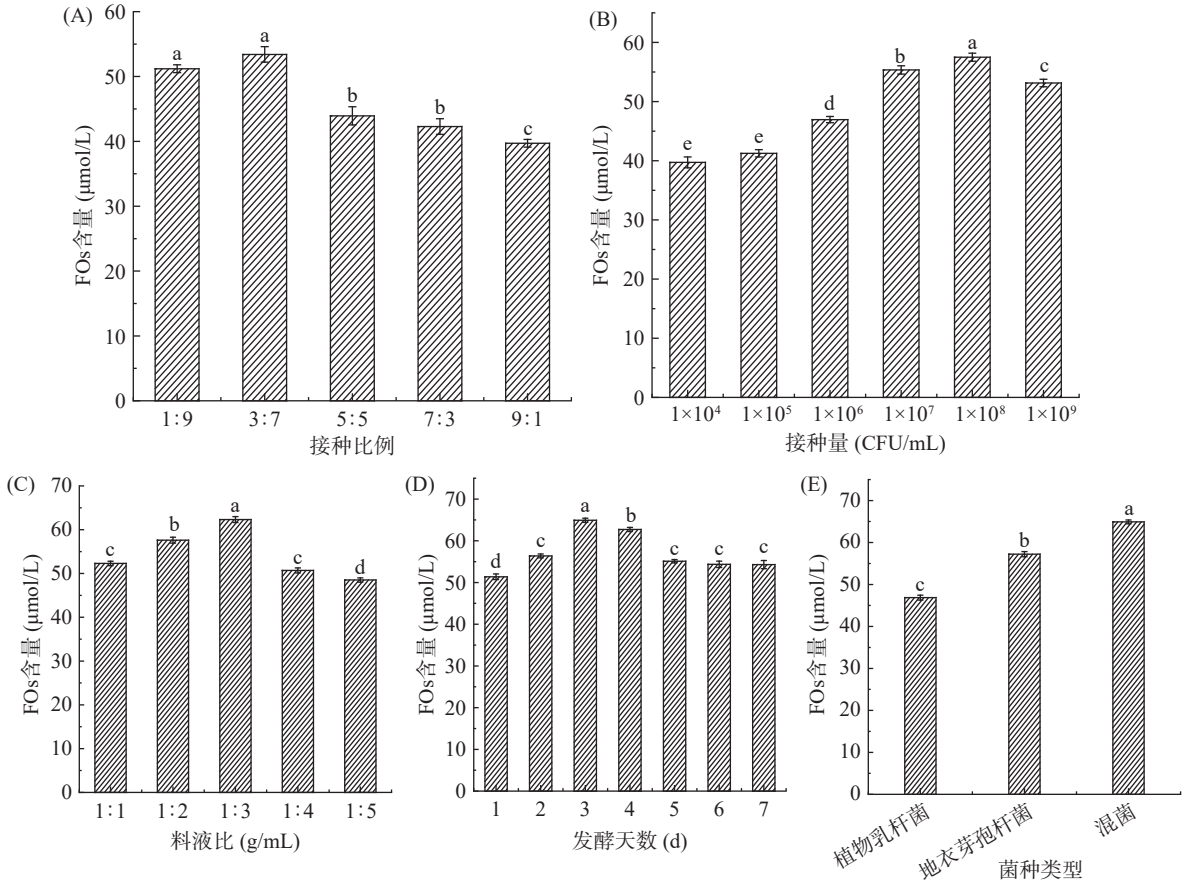


图 1　混菌发酵米糠接种比例(A)、接种量(B)、料液比(C)、发酵天数(D)、菌种类型(E)对 FOs 含量的影响

Fig.1　Effects of inoculation ratio (A), inoculation amount (B), solid-liquid ratio (C), fermentation days (D) , and strain type (E) on the content of FOs in rice bran during mixed bacterial fermentation

注：不同字母表示差异显著(P<0.05)，图 2 同。

62.3 μmol/L，高料液比导致米糠浓度降低，底物供应不足限制微生物代谢活性，进而抑制 FOs 合成。FOs 含量于第 3 d 达到最高值 64.9 μmol/L，之后逐渐下降。发酵初期微生物酶活性快速提升，加速分解米糠中的多糖及蛋白质，释放碳源和氮源促进 FOs 合成，后期可能因底物耗尽或代谢副产物积累导致产量下降。卜雯丽等[28] 利用出芽短梗霉固态发酵啤酒糟，FOs 产量在第 4 d 达到最高 37.67 μmol/L。本研究中，植物乳杆菌和地衣芽孢杆菌单菌发酵制备 FOs 的含量分别在第 4 d 和第 3 d 达到最高 46.87 μmol/L 和 57.23 μmol/L，而混菌发酵体系在 3 d 内达到 64.9 μmol/L，表明菌种协同作用可以提高 FOs 的制备效率。因此，混菌发酵米糠制备 FOs 的最优条件为接种比例 3:7、接种量 1×10^8 CFU/mL、料液比 1:3 g/mL、发酵时间 3 d。

2.2　发酵过程酶活力变化

由图 2 可知，发酵期间，4 种酶的活力均呈现出先升高后降低的趋势。淀粉酶、纤维素酶和木聚糖酶的活性在发酵的第 3 d 达到了峰值，蛋白酶的活性则在发酵的第 4 d 达到了最高值，酶活力分别为 0.18、0.47、0.17 和 0.31 U/mL，FOs 的含量在第 3 d 也达到了最高值。木聚糖酶是 FOs 合成的关键酶，

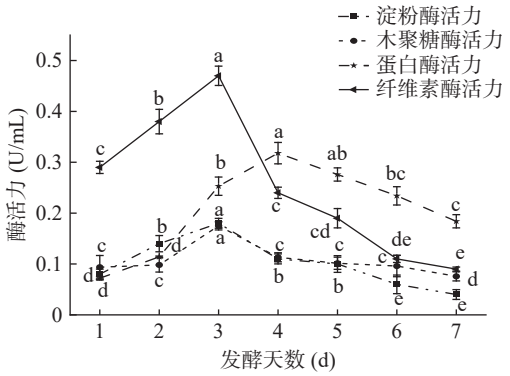


图 2　米糠发酵过程中的酶活力变化

Fig.2　Changes of enzyme activity during rice bran fermentation

直接断裂木聚糖的糖苷键并释放结合态阿魏酸，生成 FOs 单体[29]，而淀粉酶、蛋白酶和纤维素酶可通过提供碳源、释放前体物质及暴露木聚糖作用位点等间接作用，共同强化木聚糖酶的催化过程，从而提升 FOs 生成效率[1]。

2.3　发酵米糠和 FOs 的表征分析

2.3.1　发酵米糠扫描电镜分析　未发酵米糠和发酵米糠的微观结构如图 3 所示，未发酵米糠(a, b)呈完整球形且表面光滑致密，表明其细胞壁结构完整。发

酵第 1 d(c, d)米糠颗粒表面出现局部破损和粗糙化，表明植物乳杆菌和地衣芽孢杆菌所分泌的酶开始降解米糠中的淀粉、蛋白质及纤维组分，米糠细胞壁的致密结构部分被破坏。发酵第 3 d(e, f)，颗粒破碎程度加深且结构显著松散，此时 FOs 含量达到峰值。可能是由于结构松散增大了酶与底物的接触面积，加速 FOs 生成。发酵第 5 d(g, h)，颗粒转变为细小片状并形成疏松网络结构，表明细胞壁多糖被大量分解为低分子量片段，但 FOs 含量可能因微生物代谢消耗而开始下降。发酵第 7 d(i, j)，颗粒几乎完全崩解为高度分散的片状结构，但酶活性降低可能导致 FOs 合成效率降低。

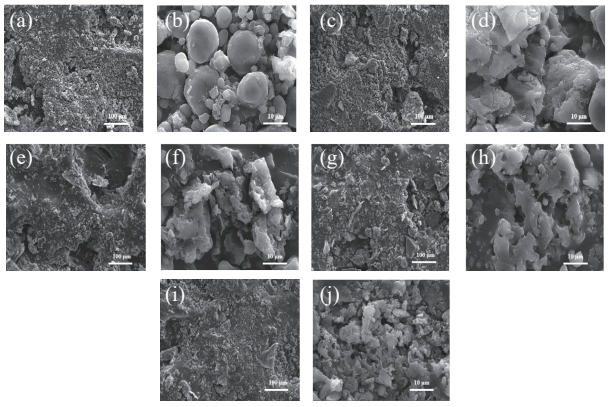


图 3 不同发酵天数米糠颗粒的扫描电镜图

Fig.3 Scanning electron microscope images of rice bran particles with different fermentation days

注：a、b：未发酵组；c、d：发酵第 1 d；e、f：发酵第 3 d；g、h：发酵第 5 d；i、j：发酵第 7 d；a、c、e、g、i 为 500×，标尺 100 μm；b、d、f、h、j 为 5000×，标尺 10 μm。

2.3.2 FOs 光谱表征分析 混菌发酵米糠制备 FOs 的紫外光谱如图 4(A)所示，FOs 与 FA 均在 325、286 nm 附近有吸收峰，表明二者之间有相似结构。混菌发酵米糠制备的 FOs 在 325 nm 处的吸收强度较 FA 有明显提升，这是因为 FOs 的 FA 基团通过酯键与低聚糖骨架相连，这证明发酵米糠来源的 FOs 中，阿魏酰基主要以酯化形态存在。红外光谱图 4(B)进一步揭示了 FOs 的分子结构特征：3306 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 O-H 的伸缩振动，表明分子中存在羟基及氢键网络，2934 cm^{-1} 处的吸收峰源于脂肪族 C-H 伸缩振动，通常与糖类分子中的-CH_2 和-CH 基团相关[30]。1730 cm^{-1} 处的吸收峰是 C=O 的伸缩振动，表明 FA 与糖单元通过酯键连接[31]。1404 cm^{-1} 和 1245 cm^{-1} 处的吸收峰可能为 C-H 键的变角振动，898 cm^{-1} 处的吸收峰是 β-吡喃糖苷键中 C-H 变角振动[32]，证实糖单元为吡喃环构型。以上结果表明混菌发酵米糠所制备的产物为阿魏酰基酯化修饰的低聚糖类化合物即 FOs。

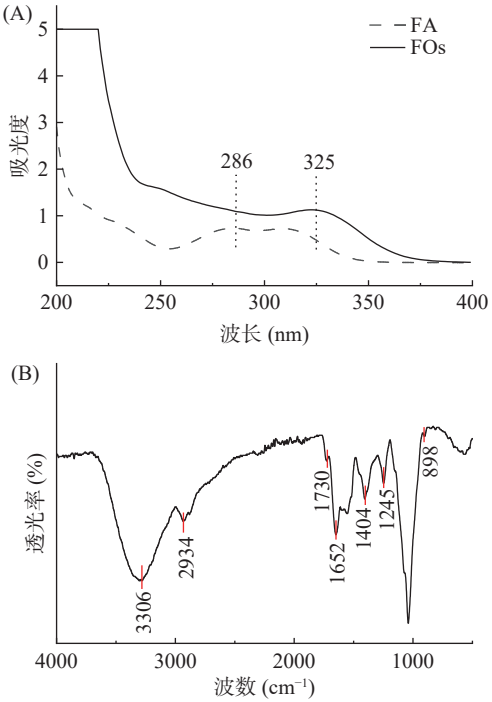


图 4 FOs 的光谱表征

Fig.4 Spectroscopic characterization of FOs

注：(A)紫外光谱图；(B)红外光谱图。

2.3.3 FOs 液相色谱-质谱联用表征分析 由图 5 可以看出，FOs 展现出良好的分离效果，正离子模式下分别检测到三个特征峰，保留时间：4.1、4.9、7.2 min，依次标注为色谱峰 1~3。由图 6 可知，峰 1 的准分子离子 $[M+Na]^+$ m/z 为 613，推断其分子量为 590；峰 2 的准分子离子 $[M+H]^+$ m/z 为 855，推断其分子量为 854；峰 3 的准分子离子 $[M+Na]^+$ m/z 为 1008，推断其分子量为 986。FOs 由酯化的阿魏酸、阿拉伯糖和木糖构成，且阿魏酸通过酯键连接阿拉伯木聚糖侧链，可进一步推断色谱峰 1、2、3 分别对应于 FOs_2(分子量 590)，FOs_4(分子量 854)以及 FOs_5(分子量 986)，这些结构与 FOs 的已知分类一致。龚冰烨[33]的研究表明，酶解法制备的 FOs 聚合度分布较宽，主

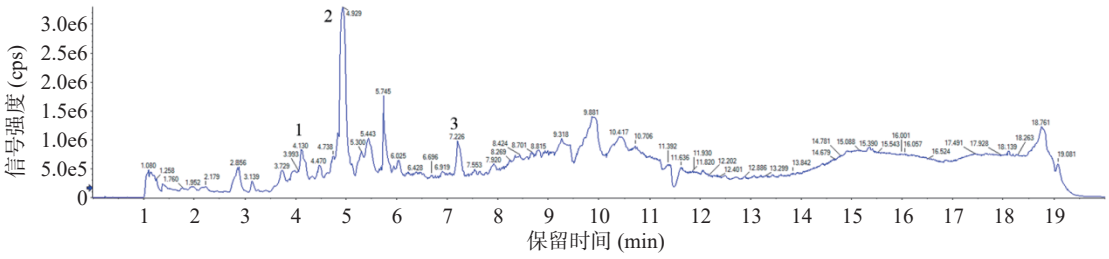


图 5 FOs 的总离子流图

Fig.5 Total ion flow diagram of FOs

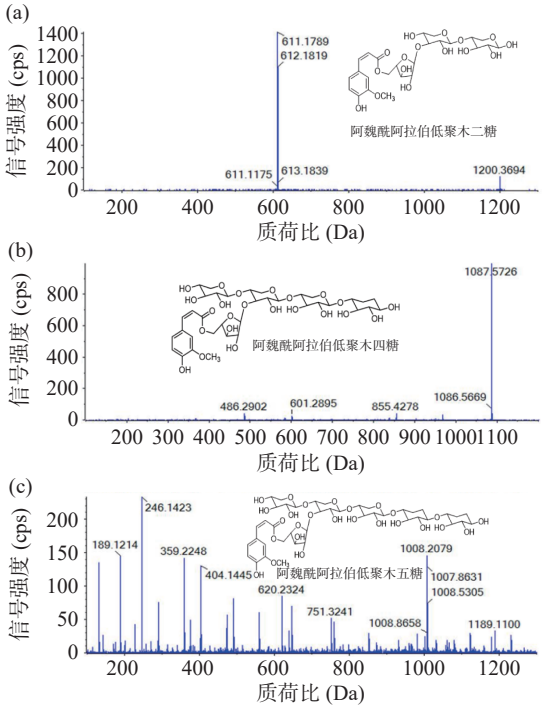


图 6　不同色谱峰对应的 FOs 正离子质谱图与化学结构式

Fig.6　Positive ion mass spectra and chemical structures of FOs corresponding to different chromatographic peaks

注：(a)色谱峰 1；(b)色谱峰 2；(c)色谱峰 3。

要为 4~8，而发酵法所得 FOs 聚合度更集中，主要为 4~6，产物均一性更高。

2.4　FOs 对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制作用

如图 7 所示，FA、FOs、木糖和低聚木糖对两种消化酶均具有抑制作用，且随着质量浓度升高，抑制作用逐渐增强。在相同质量浓度下，FOs 的抑制率略低于 FA，显著高于木糖以及低聚木糖的抑制活性（P<0.05）。在浓度为 10 mg/mL 时，FOs 对两种酶的抑制活性与阳性对照 FA 相当，抑制率为 58.34% 和 95.70%，无显著性差异（P>0.05），表明 FOs 在高浓度下具有与 FA 相当的酶抑制潜力。FA 结构中含有的羟基和羧基可能增强了其与酶的结合能力，从而提高了抑制效果[34]。FOs 对两种酶的抑制效果相较于 FA 略低，可能由于 FOs 的酯化作用使部分游离羧基被占据，从而减弱了与酶的结合，同时低聚糖链的空间位阻效应也可能会阻碍阿魏酸基团与酶活性中心的充分接触。

2.5　FOs 对大米淀粉消化性的影响

如图 8 所示，在模拟肠消化阶段（180 min）内，淀粉水解速率呈现快速上升趋势。在模拟肠消化进行至 180 min 时，大米淀粉水解度为 43.54%，而当添加 FOs 后，水解度降为 37.15%，显著低于原大米淀粉组及添加木糖、低聚木糖组（P<0.05），但与 FA 组无显著差异（P>0.05）。动力学分析表明（表 1），FOs 组的速率常数 k 值最低，为 0.0401 min^{-1}，表明 FOs 可有效延缓大米淀粉水解。原大米淀粉三种淀粉含量分别为 42.21%、14.46% 和 43.32%，添加 FOs 后，

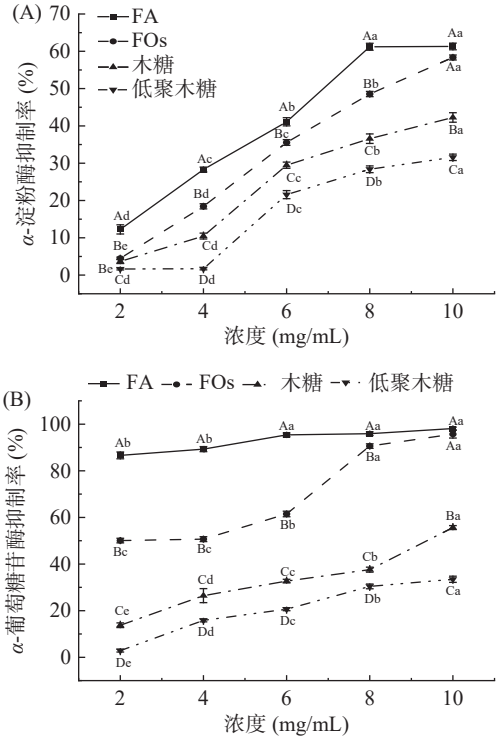


图 7　不同浓度 FA、FOs、木糖和低聚木糖对 α-淀粉酶（A）和 α-葡萄糖苷酶（B）抑制率的影响

Fig.7　Effects of different concentrations of FA, FOS, xylose and xylooligosaccharide on α-amylase (A) and α-glucosidase (B) inhibition rate

注：不同大写字母表示相同浓度下不同样品的抑制率存在差异显著（P<0.05），不同小写字母表示同一样品不同浓度的抑制率存在差异显著（P<0.05）。

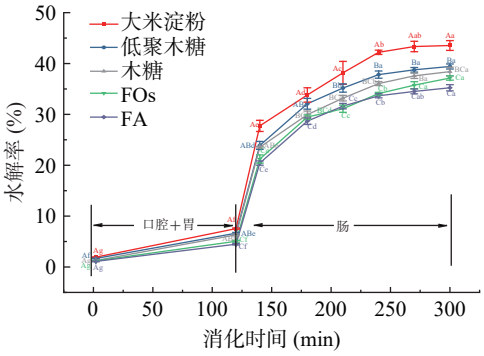


图 8　FA、FOs、木糖和低聚木糖对大米淀粉水解率的影响

Fig.8　Effects of FA, FOs, xylose and xylooligosaccharides on hydrolysis rate of rice starch

注：不同大写字母表示相同消化时间下不同样品的水解率存在差异显著（P<0.05），不同小写字母表示同一样品不同消化时间的水解率存在差异显著（P<0.05）。

RDS 和 SDS 含量降至 34.09% 和 12.85%，RS 含量为 53.04%，表明 FOs 可以通过降低 RDS 和 SDS 含量，增加 RS 含量来抑制大米淀粉的消化。FA 通过减少酶与底物的接触或直接抑制酶活性来降低水解率。FOs 部分保留了 FA 的抑制特性，但因分子量较小，其抑制效果稍弱于 FA。相比之下，木糖和低聚木糖因分子结构简单，缺乏酚羟基等活性基团，抑制能力有限。龚冰烨[33] 研究发现，FOs 在 10% 添加量

表 1 大米淀粉体外模拟消化特征参数

Table 1 Characteristic parameters of simulated digestion of rice starch *in vitro*

样品名称	C_∞(%)	k(min^{-1})	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)
大米淀粉	41.24±1.76	0.0471±0.010	42.21±0.42^{a}	14.46±1.39^{a}	43.32±1.73^{c}
低聚木糖	37.62±1.13	0.0440±0.007	37.82±0.71^{b}	13.91±1.42^{a}	48.26±2.11^{b}
木糖	35.98±1.43	0.0451±0.009	36.05±0.39^{c}	12.50±0.56^{a}	51.43±0.96^{ab}
FOs	34.61±1.28	0.0401±0.007	34.09±0.24^{d}	12.85±0.64^{a}	53.04±0.54^{a}
FA	33.77±0.91	0.0409±0.005	33.66±0.41^{d}	13.32±0.45^{a}	53.00±0.75^{a}

注: 同一列中不同字母表示具有显著性差异(P<0.05)。

下对 α-淀粉酶活性有明显的抑制效果, 可减少 RSD 含量, 而低聚木糖对淀粉的消化抑制作用不明显。

2.6 FOs 对 AGEs 的抑制作用

如图 9 所示, 在添加 FA 和 FOs 后, 糖基化 BAS 的荧光强度显著降低(P<0.05), 并呈现剂量依赖性效应, 证明 FA 及 FOs 对 AGEs 的生成均具有抑制效果。0.2 mg/mL 的低聚木糖及 0.2~0.6 mg/mL 的木糖反而促进了 AGEs 生成, 这可能是由于糖类底物在低浓度下加速了非酶糖基化反应的早期阶段, 而在高浓度下可能竞争性占据蛋白质活性位点, 阻碍葡萄糖与蛋白质的结合。由表 2 可知, 在 1 mg/mL 浓度下, FA、FOs 对 AGEs 的抑制率分别为 94.18%±0.55%、75.45%±2.02%, 而低聚木糖和木糖的抑制效果较弱。WANG 等[35] 的研究也表明, FOs 对 AGEs 有较强的抑制作用, 在 BSA-Glu 模拟体系中, 1.0 mg/mL 的小麦麸皮 FOs 对 AGEs 抑制率可达 64%。FA 是一种小分子酚酸, 其游离羧基和酚羟基结构使其能直接与蛋白质活性位点结合, 形成稳定的复合物, 从而

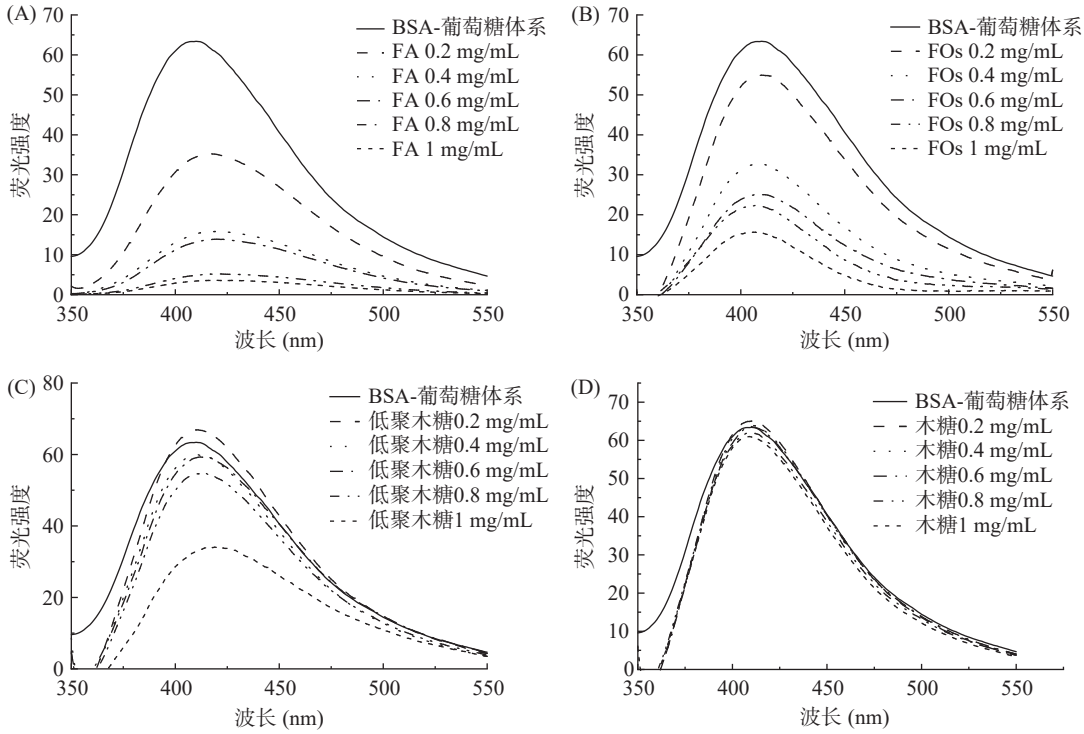


图 9 抑制剂浓度对 AGEs 荧光强度的影响

Fig.9 Effect of inhibitor concentration on fluorescence intensity

注: (A)FA, (B)FOs, (C)低聚木糖, (D)木糖。

表 2 不同浓度样品对 AGEs 生成的抑制率

Table 2 Inhibition rate of AGEs formation by samples with different concentrations

抑制率(%)	样品浓度(mg/mL)				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1
FA	46.37±1.51^{Ad}	75.1±1.32^{Ac}	78.7±0.40^{Ab}	92.87±0.46^{Aa}	94.18±0.55^{Aa}
FOs	14.51±1.66^{Bd}	49.22±1.55^{Bc}	59.95±1.83^{Bb}	64.88±1.11^{Bb}	75.45±2.02^{Ba}
低聚木糖	–	6.14±1.13^{Cc}	6.19±0.71^{Cc}	13.61±0.65^{Cb}	46.64±1.43^{Ca}
木糖	–	–	–	2.58±0.55^{Da}	4.16±0.62^{Da}

注: 同一列不同大写字母表示相同浓度下不同样品对AGEs生成的抑制率存在显著性差异(P<0.05), 同一行不同小写字母表示相同样品在不同浓度下对AGEs生成的抑制率存在显著性差异(P<0.05)。

有效抑制 AGEs 的形成。FOs 是 FA 的酯化衍生物，其酯键结构阻碍了活性基团与蛋白质的直接结合，因此抑制效果低于 FA[36]，但通过抗氧化途径仍可以显著抑制糖基化反应。

2.7　FOs 体外抗氧化活性测定结果

由图 10 可知，随 FOs 质量浓度的提高，其对 DPPH 以及 $ABTS^+$自由基的清除率及其总还原能力均逐渐增强，且在同一浓度下，显著高于低聚木糖（$P<0.05$）。当质量浓度达到 1 mg/mL 时，FOs 的抗氧化能力与 FA 接近，对 DPPH 自由基的清除率为 78.15%，对 $ABTS^+$自由基的清除率为 87.80%，总还原能力为 3.50。FA、FOs 和低聚木糖对 DPPH 自由基清除率的 IC_{50} 值分别为 0.007、0.26 和 8.98 mg/mL，对 $ABTS^+$自由基清除率的 IC_{50} 值分别为 0.009、0.088 和 8.62 mg/mL，清除自由基能力 FA>FOs>低聚木糖。FOs 的抗氧化活性主要源自其分子内部的阿魏酸基团与低聚糖结构之间的协同效应。FA 分子结构中的酚羟基具有高效电子供给能力，而 FOs 作为寡聚体可能因空间位阻或活性基团掩蔽导致自由基捕获能力减弱[37]。YIN 等[38] 通过酶法从白酒酒糟提取 FOs，对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基具有明显的清除活性，其 Trolox 当量分别为 366.8±10.38 和 0.35±0.01 mmol/mg 样品，但清除效果弱于 FA。酶解法制备的 FOs 聚合度范围大于发酵法[33]，这种结构差异可能导致酶解法 FOs 在高浓度时表现出更强自由基清除能力，而发酵法 FOs 在低浓度（1 mg/mL）下即接近 FA 活性。这一现象可能与发酵法产物具有更小的分子量或更高的活性基团暴露度有关，使其在低浓度下即可高效发挥抗氧化作用。

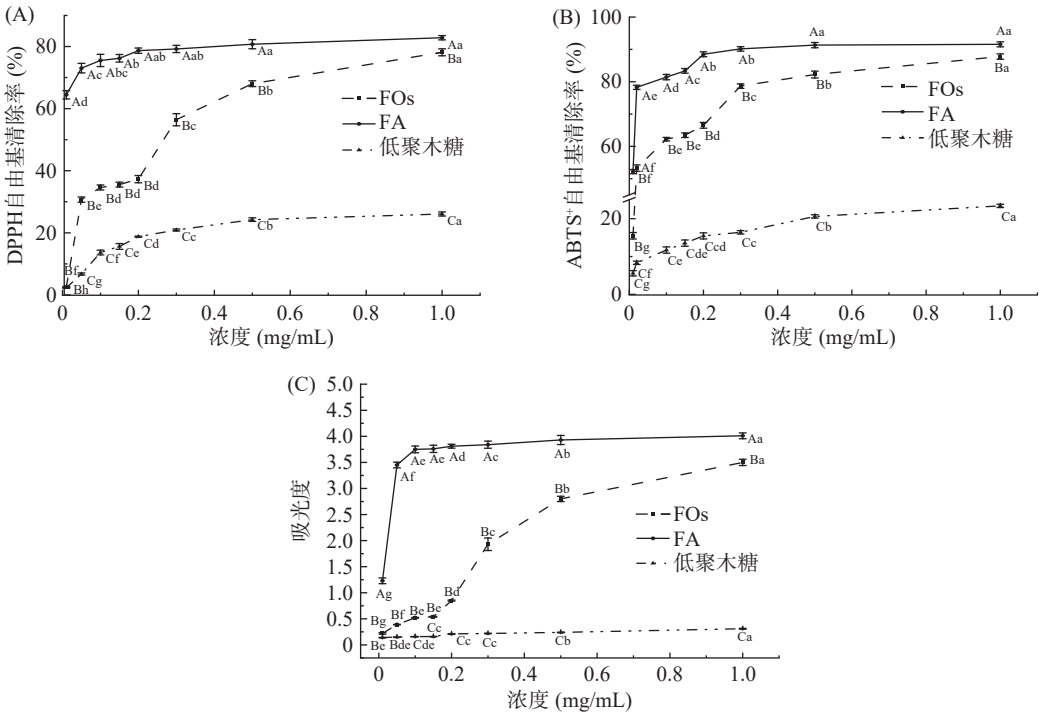


图 10　FOs 的抗氧化能力

Fig.10　Antioxidant capacity of FOs

注：（A）DPPH 自由基清除能力，（B）$ABTS^+$自由基清除能力，（C）总还原能力；不同大写字母表示相同浓度下不同样品的清除率存在差异显著（$P<0.05$），不同小写字母表示同一样品不同浓度下的清除率存在差异显著（$P<0.05$）。

3　结论

本文建立了一种混菌发酵米糠制备 FOs 的绿色方法，通过植物乳杆菌和地衣芽孢杆菌的协同作用，促进了米糠细胞壁的降解及阿魏酰基酯化修饰低聚糖的释放。优化结果显示，混菌发酵的最优条件为接种比例 3∶7、接种量 1×10^8 CFU/mL、料液比 1∶3 g/mL、发酵 3 d，在此条件下 FOs 含量达到 64.9 μmol/L，发酵过程中淀粉酶、纤维素酶、木聚糖酶和蛋白酶的活性均呈现先升高后降低的趋势，其中木聚糖酶在第 3 d 达到峰值 0.17 U/mL，为 FOs 合成的关键酶。结构表征分析证明所制备 FOs 具有多个聚合度，FA 通过酯键与低聚糖的羟基结合，这种修饰使 FOs 兼具糖链与酚酸的双亲性质，增强其生物可及性。生物活性研究表明 FOs 浓度为 10 mg/mL 时对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制率分别为 58.34% 和 95.70%，大米淀粉水解率降低了 6.39%，当质量浓度达到 1 mg/mL 时，对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除率分别达 78.15% 和 87.80%，对 AGEs 生成的抑制率为 75.45%。本研究为米糠的高值化利用提供了新途径，也为 FOs 作为功能性成分在人体健康等领域的潜在应用提供了依据。

© 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] DENG Fenghong, HU Xiuting, WANG Yueru, et al. Improving the yield of feruloyl oligosaccharides from rice bran through enzymatic extrusion and its mechanism[J]. Foods, 2023, 12(7): 1369.

[2] SCHENDEL R R, BUNZEL M. Cereal grain arabinoxylans contain a unique non-feruloylated disaccharide side-chain with alpha-xylose units: α-d-xylopyranosyl-(1→3)-l-arabinose[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122810.

[3] YOUNES A, KARBOUNE S. Enzymatic generation of cocoa bean shells oligosaccharides and feruloylated oligo/polysaccharides [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103296.

[4] HE Hongju, QIAO Jinli, LIU Yan, et al. Isolation, structural, functional, and bioactive properties of cereal arabinoxylan─A critical review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(51): 15437−15457.

[5] 欧仕益, 张颖, 张景, 等. 碱解麦麸制备阿魏酸的研究[J]. 食品科学, 2002, 23(8): 162−165. [OU Shiyi, ZHANG Ying, ZHANG Jing, et al. Study on preparation of ferulic acid from wheat bran by alkaline hydrolysis[J]. Food Science, 2002, 23(8): 162−165.]

[6] WONG D W S, BATT S, ORTS W J. Preparative fractionation of feruloyl oligosaccharides produced by combinatorial enzyme digestion of arabinoxylan[J]. Advances in Enzyme Research, 2024, 12(3): 35−43.

[7] CHEN Qiuyan, ZHANG Jia, WANG Yuan, et al. Feruloyl oligosaccharides, isolated from bacterial fermented wheat bran, exhibit antioxidant effects in IPEC-J2 cells and zebrafish model[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(1): 295−306.

[8] YU Xiaohong, MAO Wanjie, GAO Wenbo, et al. Antioxidant properties of wheat bran FO sprepared by *Bacillus amyloliquefaciens* IT-45 fermentation[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(2): 816−828.

[9] FAN Ling, MA Sen, LI Li, et al. Fermentation biotechnology applied to wheat bran for the degradation of cell wall fiber and its potential health benefits: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133529.

[10] 卜雯丽. 出芽短梗霉发酵啤酒糟制备阿魏酰低聚糖和膳食纤维的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019. [BU Wenli. Preparation of feruloyl oligosaccharides and dietary fiber from brewer's spent grain fermented by *Aureobasidium pullulans*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.]

[11] 迟燕平, 卢敏, 胡楠楠, 等. 米糠发酵制备阿魏酰低聚糖研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(5): 57−61,68. [CHI Yanping, LU Min, HU Nannan, et al. Fermentation production for feruloyl oligosaccharides from rice bran[J]. Storage and Process, 2017, 17(5): 57−61, 68.]

[12] 肖凯, 邓永平, 刘宇驰, 等. 好食脉孢霉固体发酵玉米麸皮产阿魏酰低聚糖工艺优化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 1−7. [XIAO Kai, DENG Yongping, LIU Yuchi, et al. Optimization of production of ferulic oligosaccharides by solid state fermentation of *Neurospora sitophila*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 1−7.]

[13] HU Yuchao, MENG Ziqi, WANG Wenwen, et al. Carcase traits, meat quality, and lipogenic gene expression in muscle of lambs fed wheat bran feruloyl oligosaccharides[J]. Italian Journal of Animal Science, 2023, 22(1): 369−378.

[14] 史婷婷, 卢雨洁, 裴家伟, 等. 酵母菌固态发酵对麦麸蛋白的结构与功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 143−153. [SHI Tingting, LU Yujie, PEI Jiawei, et al. Effect of solid-state fermentation by yeast on the structural and functional properties of wheat bran proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 143−153.]

[15] 段元霄, 王园, 史俊祥, 等. 麦麸阿魏酰低聚糖对敌草快致氧化应激大鼠血浆和组织抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(12): 4648−4658. [DUAN Yuanxiao, WANG Yuan, SHI Junxiang, et al. Effects of wheat bran feruloyl oligosaccharides on plasma and tissue antioxidant capacities of diquat-induced oxidative stress rats[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(12): 4648−4658.]

[16] 董丽红, 陈甜妹, 曾荣, 等. 米糠固态发酵工艺优化及对其酚类物质和抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 333−343. [DONG Lihong, CHEN Tianmei, ZENG Rong, et al. Optimization of solid-state fermentation technology and effect on phenolic profiles and antioxidant activities of rice bran[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 333−343.]

[17] EL-SHISHTAWY R M, MOHAMED S A, ASIRI A M, et al. Saccharification and hydrolytic enzyme production of alkali pretreated wheat bran by *Trichoderma virens* under solid state fermentation[J]. BMC Biotechnology, 2015, 15: 37.

[18] KEHAROM S, MAHACHAI R, CHANTHAI S. The optimization study of α-amylase activity based on central composite design-response surface methodology by dinitrosalicylic acid method [J]. International Food Research Journal, 2016, 23(1): 10−17.

[19] 刘平, 胡志和, 吴子健, 等. 超高压处理菠萝蛋白酶引发构象变化与酶活力的关系[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 138−142. [LIU Ping, HU Zhihe, WU Zijian, et al. Relationship between bromelain activity and conformational changes caused by ultra high static pressure[J]. Food Science, 2014, 35(21): 138−142.]

[20] MENG Qingshan, ZHANG Fei, LIU Chenguang, et al. Measurement of cellulase and xylanase activities in *Trichoderma reesei*[M]. MACH-AIGNER A R, MARTZY R. Trichoderma reesei: MethodsandProtocols.NewYork,NY: SpringerUS,2021: 135−146.

[21] 宋春艳, 李彦林, 张蔚, 等. 源于啤酒糟的阿魏酰低聚糖组成及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 1−5, 12. [SONG Chunyan, LI Yanlin, ZHANG Wei, et al. Composition and antioxidant activity analysis of feruloyl oligosaccharides produced from brewer's grains[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(9): 1−5,12.]

[22] WANG Kunli, LI Mo, HAN Qianyun, et al. Inhibition of α-amylase activity by insoluble and soluble dietary fibers from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)[J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101057.

[23] WANG Xiaoying, JIA Ru, CHEN Wenyu, et al. Structural characteristics of *Lotus* seed starch-chlorogenic acid complexes during dynamic *in vitro* digestion and prebiotic activities[J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142329.

[24] JIA Wei, GUO Aiai, ZHANG Rong, et al. Mechanism of natural antioxidants regulating advanced glycosylation end products of Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134541.

[25] 潘志涛, 华婷玉, 王啸云, 等. 陈皮黑茶提取物协同陈皮挥发油的体外降糖、降脂及抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2025,

46(8)：341−350. ［PAN Zhitao, HUA Tingyu, WANG Xiaoyun, et al. *In vitro* hypoglycemic, hypolipidemic activities and antioxidant capacity of dark tea and *Pericarpium Citri Reticulatae* extract with pericarpium citri reticulatae volatile oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 341−350.］

［26］ 袁欣, 朱慧娟, 马玲君, 等. 超微粉碎和超高压对大麦若叶理化性质及多酚抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 78−86. ［YUAN Xin, ZHU Huijuan, MA Lingjun, et al. Effects of superfine grinding and high-pressure processing on physicochemical properties and polyphenol antioxidant activity of barley leaves [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 78−86.］

［27］ MALINO A P, KEPEL B J, BUDIARSO F D H, et al. *In vitro* test of antioxidant activity of leilem leaf ethanol extract (*Clerodendrum minahassae*) using DPPH and FRAP methods[J]. Heca Journal of Applied Sciences, 2024, 2(1): 27−34.

［28］ 卜雯丽, 李凤伟, 王杰, 等. 出芽短梗霉固态发酵啤酒糟制备阿魏酰低聚糖和膳食纤维工艺研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(5): 38−43. ［BU Wenli, LI Fengwei, WANG Jie, et al. Preparation process of feruloyl oligosaccharides and dietary fiber from brewer's spent grain by solid-state fermentation of *Aureobasidium pullulans* [J]. China Brewing, 2019, 38(5): 38−43.］

［29］ YU Xiaohong, XING Aohui, WU Xuanming, et al. Preparation and characterization of ferulic oligosaccharides from different sources by cell-free GH10 and GH11 xylanases[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(P6): 137287.

［30］ WOLKERS F W, OLIVER E A, TABLIN F, et al. A Fourier-transform infrared spectroscopy study of sugar glasses[J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(6): 1077−1085.

［31］ WIERCIGROCH E, SZAFRANIEC E, CZAMARA K, et al. Raman and infrared spectroscopy of carbohydrates: A review[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017, 185: 317−335.

［32］ 张帆, 钟伟华, 吕春秋, 等. 九蒸九制工艺过程中黄精理化品质特征及多糖组分的演变[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 171−180. ［ZHANG Fan, ZHONG Weihua, LÜ Chunqiu, et al. Physicochemical characteristics of polygonatum sibiricum root and evolution of its polysaccharide components during the nine-steam-nine-bask process[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(9): 171−180.］

［33］ 龚冰烨. 阿魏酰低聚糖微胶囊的制备及生物活性研究[D]. 盐城: 盐城工学院, 2023. ［GONG Bingye. Preparation and biological activity of feruloyl oligosaccharide microcapsule[D]. Yancheng: Yancheng Institute of Technology, 2023.］

［34］ CHEN P C, DLAMINI B S, CHEN C R, et al. Structure related *α*-glucosidase inhibitory activity and molecular docking analyses of phenolic compounds from *Paeonia suffruticosa*[J]. Medicinal Chemistry Research, 2022, 31(2): 293−306.

［35］ WANG Jing, SUN Baoguo, CAO Yanping, et al. Protein glycation inhibitory activity of wheat bran feruloyl oligosaccharides[J]. Food Chemistry, 2009, 112(2): 350−353.

［36］ HUANG J Q, REN J Y, TAO G, et al. Maize bran feruloylated oligosaccharides inhibited AGEs formation in glucose/amino acids and glucose/BSA models[J]. Food Research International, 2019, 122: 443−449.

［37］ LI Xican, CHEN Ban, XIE Hong, et al. Antioxidant structure-activity relationship analysis of five dihydrochalcones[J]. Molecules, 2018, 23(5): 1162.

［38］ YIN Zhongtian, LIU Mengyao, WANG Bowen, et al. Extraction, identification, and *in vitro* anti-inflammatory activity of feruloylated oligosaccharides from Baijiu distillers' grains[J]. Foods, 2024, 13(8): 1283.