

发酵大麦麸皮提取物对HepG2细胞脂质沉积及氧化应激的缓解作用

肖梅, 伍雪梅, 祝莹, 张家艳, 肖香, 赵延胜*

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 该研究通过 HepG2 高脂细胞模型, 研究植物乳植杆菌 dy-1 发酵大麦麸皮提取物 (FBBE) 对细胞脂质沉积及氧化应激的影响。结果显示, 大麦麸皮经植物乳植杆菌 dy-1 发酵后, 其蛋白含量未发生显著变化, 但 52 ku 左右较大分子量的蛋白基本被完全水解, 20~35 ku 的蛋白显著增加, 总糖含量降低了约 28%, 总酚含量增加了约 42%; 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 FBBE 使高脂细胞的 TG 含量降低了 20.30%, 5、10 和 15 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的发酵大麦麸皮提取物中多酚组分 (FBBE-PP) 使细胞 TG 水平分别降低了 16.97%、27.41% 和 34.92%, 同时使细胞内脂滴数量显著减少, 说明多酚组分是缓解细胞脂质沉积的有效成分; 添加 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 FBBE-PP 后, 细胞内活性氧 (ROS) 含量相比模型组降低了 23.45%, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性升高了 40.80%; FBBE-PP 可上调细胞 *ppar- α* 和 *cpt-1 α* 的表达, 下调 *scd-1* 和 *acc-1* 的表达缓解细胞脂质沉积; 并上调 *nrf2*、*ho-1*、*sod1* 和 *cat* 等的表达增强细胞抗氧化应激能力。综上所述, 植物乳植杆菌 dy-1 的发酵有助于提升大麦麸皮的降脂及抗氧化活性, 其多酚组分对高脂诱导的细胞脂质沉积和氧化应激均具有显著的缓解作用。

关键词: 植物乳植杆菌; 大麦麸皮; 多酚; 脂质沉积; 氧化应激

文章编号: 1673-9078(2025)03-12-20

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0196

Alleviating Effect of Fermented Barley Bran Extract on Lipid Deposition and Oxidative Stress in HepG2 cells

XIAO Mei, WU Xuemei, ZHU Ying, ZHANG Jiayan, XIAO Xiang, ZHAO Yansheng*

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In this study, the effects of barley bran extract fermented by *Lactiplantibacillus plantarum* dy-1 (*Lp. plantarum* dy-1) (FBBE) on lipid deposition and oxidative stress were investigated through a HepG2 high-lipid cell model. The results showed that, the protein content of barley bran did not change significantly after the fermentation with *Lp. plantarum* dy-1, but the protein with a relatively high *M_w* (around 52 ku) in barley bran was basically completely hydrolyzed, with the protein of 20~35 ku increasing significantly. The total sugar content was reduced by about 28% and the total phenolic content increased by about 42%. The FBBE treatment at 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ decreased the TG content by 20.30%, whilst

引文格式:

肖梅, 伍雪梅, 祝莹, 等. 发酵大麦麸皮提取物对HepG2细胞脂质沉积及氧化应激的缓解作用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(3):12-20.

XIAO Mei, WU Xuemei, ZHU Ying, et al. Alleviating effect of fermented barley bran extract on lipid deposition and oxidative stress in HepG2 cells [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 12-20.

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2022353); 镇江市重点研发计划项目 (NY2022023); 盐城市重点研发计划项目 (YCBN202302)

作者简介: 肖梅 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 15755082683@163.com

通讯作者: 赵延胜 (1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: zhaoy@s@ujs.edu.cn

the polyphenols in the FBBE (FBBE-PP) at 5, 10 or 15 $\mu\text{g/mL}$ decreased the TG levels by 16.97%, 27.41% and 34.92%, respectively, while reducing significantly the number of lipid droplets in the cells, indicating that polyphenol constituents were the effective components to alleviate lipid deposition in cells. After the FBBE-PP treatment at 10 $\mu\text{g/mL}$, the intracellular ROS content decreased by 23.45% and the SOD activity increased by 40.80%, compared with the model group. The FBBE-PP could up-regulate the expressions of *ppar- α* and *cpt-1 α* , down-regulate the expressions of *scd-1* and *acc-1* to alleviate cell lipid deposition, while up-regulating the expressions of *nrf-2*, *ho-1*, *sod1* and *cat* to enhance the antioxidative stress ability of cells. In conclusion, the fermentation with *Lp. plantarum* dy-1 could improve the lipid-lowering and antioxidant activities of barley bran, and its polyphenol components could significantly alleviate high-fat induced lipid deposition and oxidative stress in cells.

Key words: *Lactiplantibacillus plantarum*; barley bran; polyphenols; lipid deposition; oxidative stress

发酵是改善食品性质、功能及营养缺陷的重要方法，也是谷物加工的重要手段。作为食品工业广泛应用的菌种之一^[1]，乳酸菌发酵可大大提高谷物中营养成分的生物利用度，促进食品组分的改性和活性因子的释放，有利于营养及功能品质的提升^[2]。如提高高粱中蛋白和淀粉的消化率^[3]，增加大麦发酵产物中游离酚的含量及其生物利用度等^[4]。乳酸菌发酵在谷物食品中的研究与应用，对提升食品品质具有重要意义。课题组在前期研究中，采用自主筛选的植物乳植杆菌 dy-1 (*Lactiplantibacillus plantarum* dy-1, *Lp. plantarum* dy-1) 发酵大麦全粉，结果显示发酵大麦提取物的抗氧化^[5]及降脂活性显著增强^[6,7]，其中的 β -葡聚糖组分可通过 *daf-2/daf-16* 途径缓解秀丽隐杆线虫的氧化应激^[8]，蛋白组分具有抑制脂肪积累的能力^[9]。说明 *Lp. plantarum* dy-1 发酵有利于大麦中活性组分的释放及其功能活性的提升。

大麦麸皮是大麦加工的主要副产物，富含膳食纤维、多酚等活性成分，具有较好的健康食品开发潜力。对大麦麸皮进行发酵处理，不仅有利于膳食纤维的改性，而且还有利于促进大麦结合态酚向游离态酚的转化，进而提高其潜在抗氧化、抗炎等功能特性^[10]。因此，本文采用 *Lp. plantarum* dy-1 对大麦麸皮进行发酵处理，首先分析发酵对大麦麸皮提取物中主要成分含量的影响，进一步通过油酸构建 HepG2 高脂细胞模型，评价发酵大麦麸皮提取物及其多酚组分对细胞脂质沉积的缓解作用，探讨提取物中多酚组分对高脂诱导下细胞氧化应激的改善效果，并解析多酚组分影响细胞脂代谢及氧化应激基因表达的相关作用途径，为揭示发酵大麦麸皮的健康促进机制提供研究依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大麦麸皮品种为扬饲麦 3 号，由江苏瑞牧生物科技有限公司提供。*Lp. plantarum* dy-1 菌株（保藏号 CGMCC 6016）由本实验室自行分离鉴定。MRS 培养基、乙醇、乙酸乙酯、福林酚等试剂购于上海国药集团；发酵试验用水为双蒸水。

HepG2 细胞，购自中国科学院生物化学与细胞生物学研究所苏州研究院；细胞 DMEM 培养基、胎牛血清等，购于美国 Gibco 公司；胰蛋白酶、RT-qPCR 引物等，购于生工生物工程（上海）股份有限公司；Cell Counting Kit-8 (CCK-8)、甘油三酯 (TG) 以及细胞氧化应激等检测试剂盒，购于南京建成生物科技有限公司；油酸（油酸钠），购于西安鲲鹏创科技有限公司。

RNA 提取试剂盒，购于康为世纪生物科技有限公司；RNA 逆转录及 RT-qPCR 分析等试剂盒，购于日本 Takara 公司。

1.2 主要仪器设备

LDZH-100L 灭菌锅，上海申安医疗器械厂；SW-CJ-2D 超净台，浙江孚夏医疗科技有限公司；ZQTY-70N 摇床，上海知楚仪器有限公司；J-26XP 真空冷冻离心机，美国贝克曼库尔特有限公司；FD-8 真空冷冻干燥，北京博医康有限公司；UPLC/Q Exactive Plus 质谱仪，美国赛默飞世尔科技公司；Eclipse Ti-S 荧光倒置显微镜，日本尼康株式会社。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备方法

大麦麸皮经除杂后，过 30 目筛，按 1:7 固液比

与水混合，并加入活化后的 *Lp. plantarum* dy-1 (活菌数为 1×10^7 CFU/mL)，于 31 °C 下发酵 24 h 后离心取上清，真空冷冻干燥获得发酵大麦麸皮上清提取物 (FBBE) 冻干粉；未接种 *Lp. plantarum* dy-1 的大麦麸皮按照上述步骤，获得未发酵大麦麸皮提取物 (Raw Barley Bran Extract, RBBE) 冻干粉^[11]。

1.3.2 样品中主要成分的分析方法

采用福林酚法测定总酚含量。凯氏定氮法测定蛋白质含量，将待测样品、K₂SO₄、CuSO₄ 和 H₂SO₄ 溶液按照 6:1:20 (m/m/V) 加入定氮瓶中，样品消化后置于全自动凯氏定氮仪中进行检测；采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE) 测定蛋白相对分子量；采用苯酚-硫酸法测定总糖含量，取一定量预处理后的样品加入试管中，以 1:5 (V/V) 的比例加入体积分数为 5% 的苯酚溶液和浓硫酸溶液，恒温水浴 15 min，冷却至室温后，于 490 nm 处测定吸光值。

1.3.3 多酚组分的制备

参考 Mansouri 等^[12]的方法并略作改动：向 0.5 g 大麦麸皮提取物样品中加入 10 mL 的乙醇溶液 (70%, V/V)，50 °C 下超声提取 60 min，离心并将上清液旋蒸以除去乙醇 (40 °C)，加入 70 mL 乙酸乙酯将残渣萃取 4 次，再次旋蒸浓缩 (35 °C)，获得发酵大麦麸皮提取物的多酚组分 (FBBE-PP)。

1.3.4 HepG2细胞高脂模型建立及细胞活力评价

HepG2 细胞培养基为含体积分数 10% 胎牛血清的 DMEM，培养条件为 37 °C，体积分数为 5% 的 CO₂。细胞高脂模型参照 Tao 等^[13]的方法：将 1 mL

的 HepG2 细胞 (1×10^5) 接种至 12 孔板，待细胞融合至 80%~90% 后弃去培养基，无菌 PBS 清洗培养板，然后加入油酸浓度为 0.5 mmol/L 的 DMEM 继续培养细胞 24 h，细胞表面出现黑色颗粒说明高脂模型诱导成功。细胞活力评价方法参照 CCK-8 试剂盒说明书进行。

1.3.5 细胞脂质沉积及氧化应激水平测定

向高脂细胞中分别添加 FBBE、RBBE 及 FBBE-PP，培养 24 h 后，弃去培养基并用 PBS 洗涤细胞，然后采用体积分数为 60% 的异丙醇溶液将细胞固定 30 min，PBS 重新洗涤后，加入油红 O 将细胞染色，当用 PBS 洗涤掉多余染色液后，采用荧光倒置显微镜对细胞进行拍照；向染色细胞中加入 500 μL 异丙醇振荡 10 min，转移至新的 96 孔板，450 nm 处测定 OD 值，表示细胞内的脂滴含量和水平；此外，细胞内 TG 及 ROS 含量、SOD 及 CAT 活性的测定参照试剂盒说明书步骤进行^[11]。

1.3.6 实时荧光定量PCR分析

采用 RNA 提取试剂盒对细胞 RNA 进行提取，Nanodrop 2000 核酸蛋白定量仪测定 RNA 浓度，采用 Takara PrimeScript RT Master Mix 试剂盒将 RNA 逆转录生成 cDNA，程序为 37 °C 反应 25 min，85 °C 反应 5 s；采用 TB Green® Premix EX Taq™ 试剂盒进行 RT-qPCR 分析，内参基因为 *β-actin*，根据 $\Delta\Delta CT$ 法计算 *ppar-α*、*cpt-1α*、*scd-1* 和 *acc-1* 等脂代谢基因以及 *nrf2*、*ho-1*、*sod1* 和 *cat* 等氧化应激基因相对表达量，上下游引物由上海生工设计合成，引物序列如表 1 所示。

表 1 实时荧光定量PCR引物

Table 1 Primers for real-time quantitative PCR

基因名称	上游引物序列 (5' to 3')	下游引物序列 (5' to 3')	
脂代谢 相关基因	<i>ppar-α</i>	AGGCTGTAAGGGCTTCTTTC	GCATTTGTTCCGGTTCTTCTTC
	<i>acc-1</i>	GCACCTGCTACTATTGCTACTC	CAGTCCCAGCACTCACATAAC
	<i>scd-1</i>	TTGCCAGCTCTAGCCTTTAAATTCGTACCGC TGGCACATCAACTT	TCCTGGTAGCATTATTCAGTAGTTTTGG AGACTTTCTCCGGTTCAT
	<i>cpt-1α</i>	TCCTGGTGGGCTACAAATTAC	ACAGCAGATCCATGGCATAATA
氧化应激 相关基因	<i>nrf2</i>	ATGGATTTGATTGACATCCTT	CATGTTTTTCTTTGTATCTGG
	<i>ho-1</i>	GGAACCTTCAGAAGGGCCAG	GTCCTTGGTGTTCATGGGTCA
	<i>sod1</i>	AGGTGTCTTTTGAAGATTCTGTGATC	TTTCTTCATTTCCACCTTTGGC
	<i>cat</i>	GAGCAGCCCTGACAAAATGC	GGTAGGGACAGTTCACAGGTATCTG
内参基因	<i>β-actin</i>	CCTTCCTGGGCATGGAGTCTCTG	GGAGCAATGATCTTGATCTTC

表 2 发酵大麦麸皮提取物主要成分的含量 (wt.%)

Table 2 The contents of main components in fermented barley bran extract

样品	总蛋白含量	总糖含量	总酚含量
未发酵大麦麸皮提取物	18.97±0.09 ^a	46.02±8.76 ^a	0.38±0.47 ^a
发酵大麦麸皮提取物	18.59±0.14 ^a	32.96±3.23 ^b	0.54±0.46 ^b

注: 不同字母表示结果存在显著差异 ($P < 0.05$)。

1.4 数据处理与分析

每次试验设置 3 个样品重复, 结果以平均值 ± 标准方差表示, 基于 GraphPad prism 9.0 软件对数据进行分析并作图, 采用 *t*-检验对不同组数据进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 发酵对大麦麸皮主要成分的影响

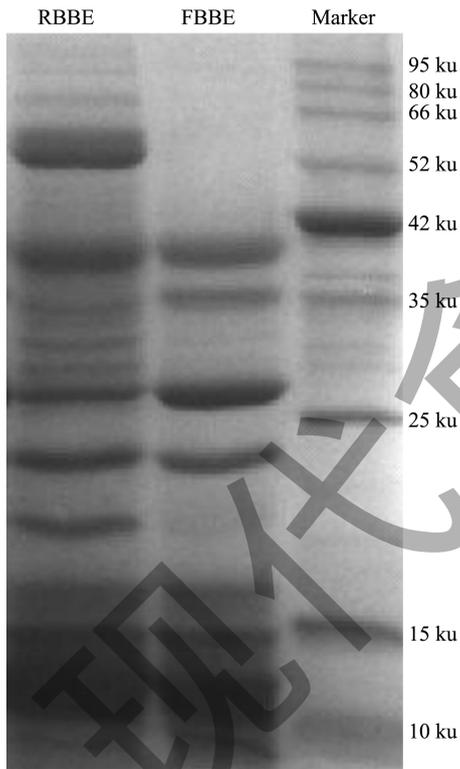


图 1 蛋白质相对分子量分析

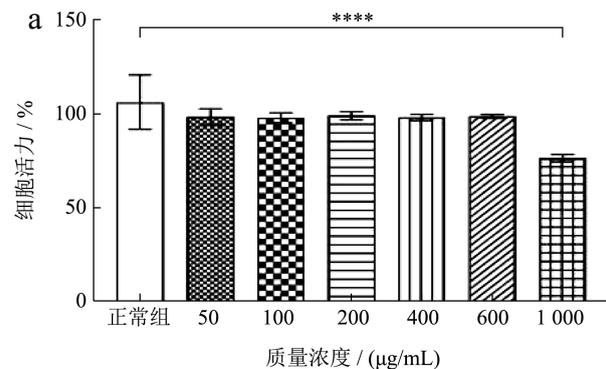
Fig.1 Molecular weight analysis of proteins

分别测定了 *Lp. plantarum* dy-1 对大麦麸皮发酵前后提取物中的蛋白、总酚及总糖含量。结果如表 2 所示, 大麦麸皮发酵后, 其提取物中蛋白含量变化不显著, 进一步采用 SDS-PAGE 分析蛋白相对分子量, 结果如图 1 所示, RBBE 中分子量在 52 ku 左右的蛋白发酵后基本被完全水解, 而 FBBE 中 20~30 ku 之间的蛋白明显增加, 说明微生物的

酵作用可使蛋白质发生一定程度的水解^[14]。而由于部分糖在发酵过程中被 *Lp. plantarum* dy-1 利用^[15], 导致发酵提取物中的总糖含量降低了约 28%, 这可能是总糖含量变化的主要原因; 此外, 经 *Lp. plantarum* dy-1 发酵后, 总酚含量相对于未发酵样品显著增加了约 42%, 前期检测分析结果显示, 经 *Lp. plantarum* dy-1 发酵后, 没食子酸、酒石酸、3,4-二甲氧基肉桂酸等酚酸类化合物或衍生物含量显著升高^[11], *Lp. plantarum* dy-1 所产的葡萄糖苷酶、酯酶等相关酶可破坏酚类物质与膳食纤维等组分之间的化学键, 有利于大麦结合态酚的释放, 并有可能促使其进一步转化为酚类衍生物^[16], 这可能是大麦麸皮经 *Lp. plantarum* dy-1 发酵后提取物活性提升的潜在重要因素。综上, *Lp. plantarum* dy-1 的发酵处理对大麦麸皮主要成分的水解和释放等起到了关键作用, 且发酵大麦麸皮提取物中的多酚组分含量变化较大。根据以往的相关研究, 推测多酚类物质起着重要作用^[17,18]。

2.2 发酵大麦麸皮提取物及其多酚组分对细胞活力的影响

考虑到添加高浓度样品会抑制细胞活力, 且不同样品对细胞活力影响的浓度不同, 因此有必要探究 *Lp. plantarum* dy-1 发酵大麦麸皮提取物及其多酚组分对细胞活力的影响。如图 2 所示, 当 RBBE 和 FBBE 添加质量浓度低于 600 $\mu\text{g/mL}$, FBBE-PP 添加质量浓度低于 20 $\mu\text{g/mL}$ 时, 其对 HepG2 细胞活力的影响不显著, 可用于后续功能试验的分析^[15]。



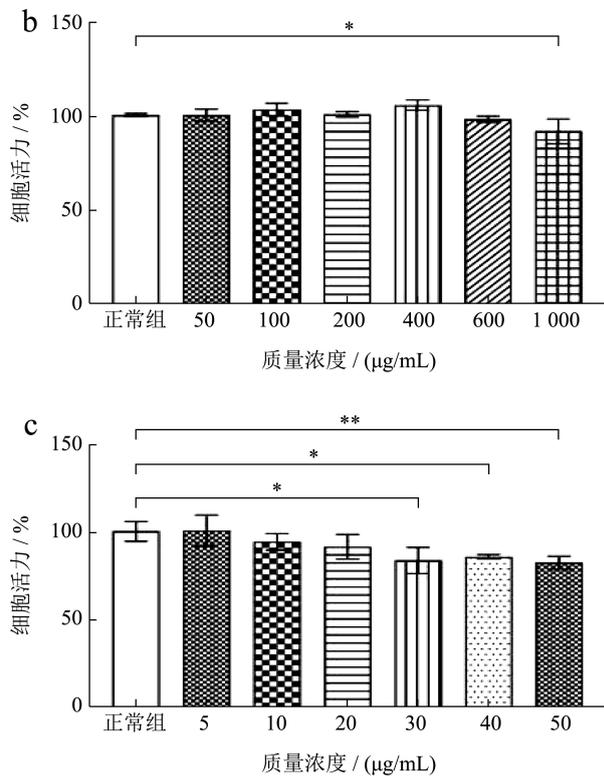


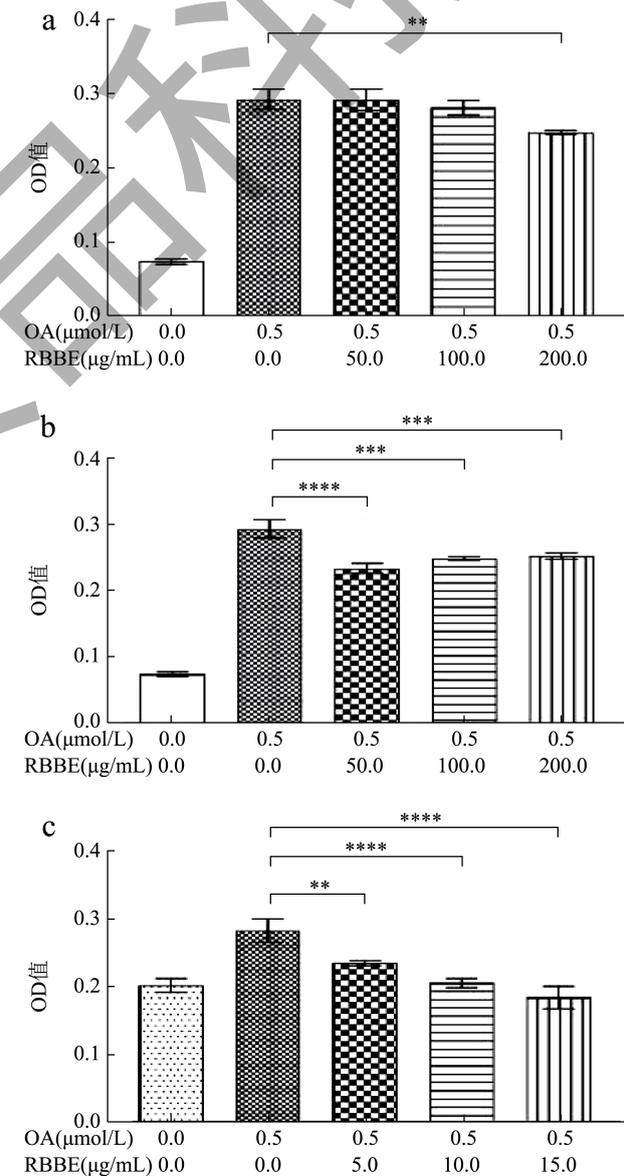
图2 HepG2 细胞活力分析结果
Fig.2 HepG2 cell viability analysis

注: a、b、c 分别为 RBBE、FBBE 和 FBBE-PP 不同添加质量浓度对细胞活力的影响; *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ****: $P < 0.001$.

2.3 发酵大麦麸皮提取物及其多酚组分对细胞脂质沉积的影响

分别向高脂细胞中添加 50、100 和 200 µg/mL 的 RBBE 和 FBBE, 以及 5、10 和 15 µg/mL 的 FBBE-PP, 培养 24 h, 通过测定油红 O 染色细胞的 OD 值以及细胞内甘油三酯 TG 含量, 评价 FBBE 及 FBBE-PP 对细胞脂质沉积的影响。结果如图 3a~3f 所示, 与模型组相比, 添加 50 和 100 µg/mL RBBE 的细胞内 TG 含量未发生显著变化, 添加 200 µg/mL RBBE 的细胞内 TG 含量降低了 15.25%; 添加 50、100 和 200 µg/mL FBBE 的细胞脂质沉积水平均显著降低 ($P < 0.005$), 其中, 添加 50 µg/mL 的 FBBE 后, 细胞内 TG 含量较模型组降低了 20.30%。说明相较于 RBBE 而言, FBBE 能够更显著地抑制油酸诱导的 HepG2 细胞脂质积累。从发酵对大麦麸皮主要成分的影响分析可知, *Lp. plantarum* dy-1 的发酵作用使多酚类物质含量增加, 这可能是 FBBE 具有降脂活性的原因之一。

与模型组相比, 5、10 和 15 µg/mL 的 FBBE-PP 使细胞内 TG 含量分别降低了 16.97%, 27.41% 和 34.92% (图 3f), 说明多酚在 FBBE 缓解细胞脂质沉积过程中发挥了重要作用。如图 3g 中油红 O 染色结果所示, 正常组细胞内仅有少量脂滴产生, 模型组细胞内则存在大量红色脂滴, 添加 10 µg/mL 的 FBBE-PP 后, 细胞内脂滴数量明显减少, 这与 OD 值测定及 TG 水平的分析结果相一致。Yao 等^[19]采用青稞提取物的多酚组分作用于 HepG2 细胞, 结果显示细胞内 TG 及总胆固醇水平显著降低。Dou 等^[20]从果皮中提取酚类物质, 发现能够有效降低秀丽隐杆线虫油红 O 染色的强度和 TG 水平。说明多酚类化合物在改善脂质沉积过程中发挥了重要的作用。



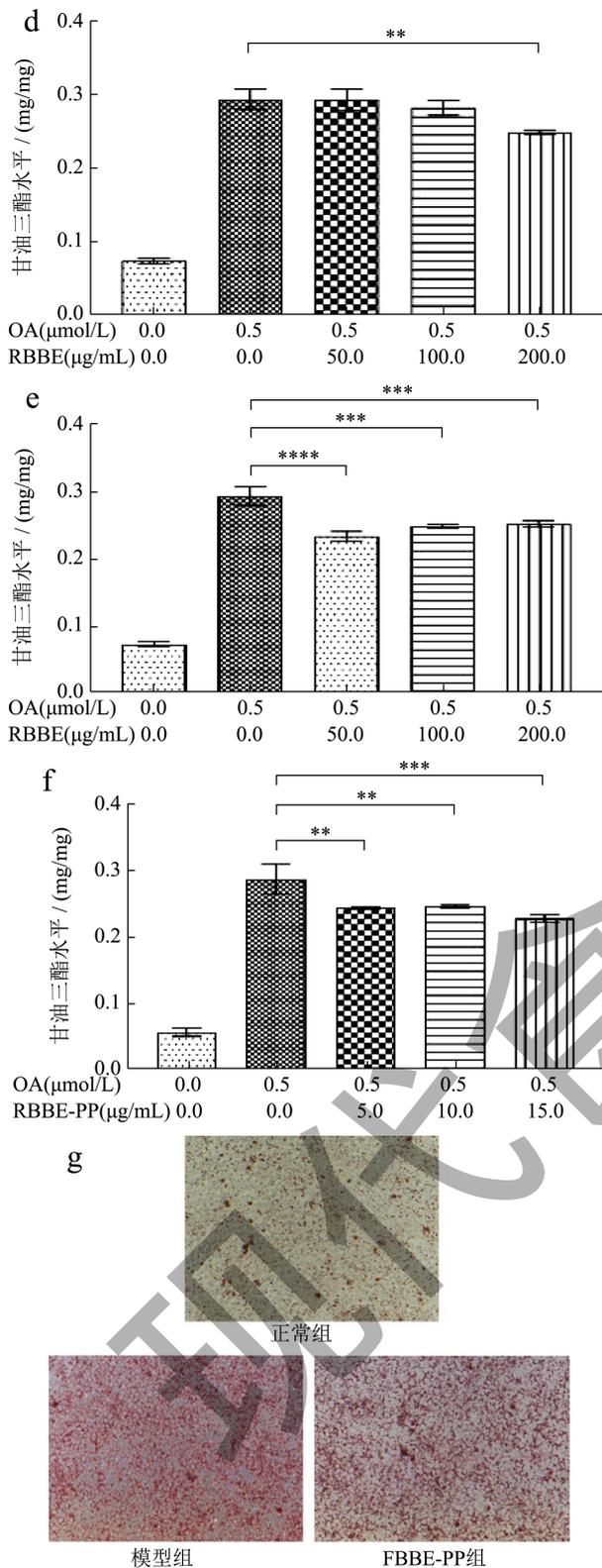


图3 FBBE对HepG2细胞脂质沉积的影响

Fig.3 The lipid deposition in HepG2 cells affected by FBBE

注: a、b、c分别为RBBE、FBBE和FBBE-PP不同添加质量浓度下细胞油红O染色的OD值测定结果; d、e、f分别为RBBE、FBBE和FBBE-PP不同添加质量浓度下细胞内TG含量的测定结果; g为细胞油红O染色显微拍照图片(200×); **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.005$, ****: $P < 0.001$ 。

2.4 发酵大麦麸皮提取物中多酚组分对细胞氧化应激的影响

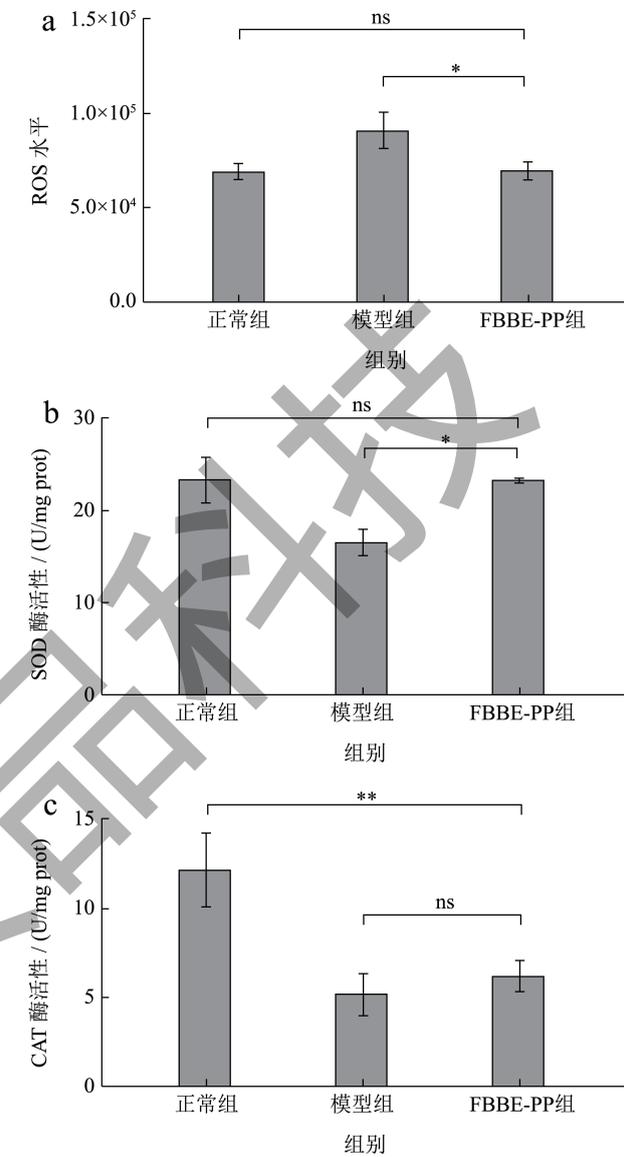


图4 FBBE-PP对HepG2细胞氧化应激的影响

Fig.4 The oxidative stress levels in HepG2 cells affected by FBBE-PP

注: *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$ 。

脂质过度累积会干扰细胞增殖、分化和凋亡的平衡, 导致细胞内自由基或过氧化物得不到及时清除, ROS含量增加, 氧化应激水平升高^[21], SOD和CAT作为细胞内抗氧化酶, 可保护细胞免受氧化应激损害^[22]。细胞ROS水平、SOD和CAT的活性测定结果显示, 与正常组细胞相比, 模型组高脂细胞内ROS含量显著增加, SOD和CAT的活性显著降低, 说明脂质沉积增加了细胞氧化应激水平, 而添加10 μg/mL的FBBE-PP后, ROS水平相比模型组降低了23.45% (图4a), SOD活性为21.30 U/mg prot,

相比模型组升高了 40.80% (图 4b); 此外, CAT 活性有上升趋势, 但与模型组相比未见显著差异 (图 4c)。分析结果表明, FBBE-PP 能够通过降低 ROS 水平、提高 SOD 活性, 缓解脂质过度积累所导致的细胞氧化应激。因此, 乳酸菌发酵可通过促进总酚含量的增加提高发酵大麦麸皮提取物的抗氧化能力^[23]。

2.5 发酵大麦麸皮提取物中多酚组分对细胞脂代谢及氧化应激基因表达的影响

脂代谢相关基因 *cpt-1a* 可控制长链脂肪酸跨越线粒体膜进行 β -氧化转运, *ppar- α* 是调控 *cpt-1* mRNA 表达的上游基因, 其激活和上调可促进脂肪酸氧化, *scd-1* 和 *acc-1* 则与脂肪酸的合成密切相关。由图 5a 可知, 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 FBBE-PP 可显著上调 *ppar- α* 和 *cpt-1a* 的表达, 相比模型组分别增加了 18.86% 和 42.28%; 显著下调 *scd-1* 和 *acc-1* 的表达, 相比模型组分别降低了 38.21% 和 40.51%。说明 FBBE-PP 可通过促进脂肪酸分解并抑制其合成调节细胞脂质代谢。Wang 等^[24]的研究表明, 橘子精油能够通过

上调 PPAR- α 和 CPT-1 的表达, 抑制高脂饮食诱导的脂质合成和氧化应激。甲基阿魏酸等酚酸类物质可通过上调 SIRT1, PPAR- α 、CPT-1 α 等通路的表达促进脂质氧化^[25]。

Nrf2 是维持细胞氧化还原稳态的关键核转录因子^[26], 血红素氧合酶 1(HO-1) 的 mRNA 表达则可在受到氧化应激和细胞损伤后上调, 并且 Nrf2 也可以直接调节 HO-1 启动子活性, 发挥抗氧化功能^[27]。如图 5b 所示, 与正常组细胞相比, 模型组细胞 *nrf2*、*ho-1*、*sod1* 和 *cat* 的表达均受到明显抑制, 添加 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ FBBE-PP 后, 细胞 *nrf2*、*ho-1*、*sod1* 和 *cat* 的表达量分别增加了 126.45%、97.70%、71.26% 和 50.30%。说明 FBBE-PP 可通过上调细胞抗氧化相关基因的表达, 提高细胞的抗氧化应激能力。已有研究表明, 甜叶菊残渣提取物可通过激活 Akt/Nrf2/HO-1 通路, 以缓解氧化应激损伤^[28]。Wang 等^[29]研究表明, 膳食补充阿魏酸可上调 Nrf2、HO-1 等蛋白的表达, 进而提高机体的抗氧化能力和脂质代谢。

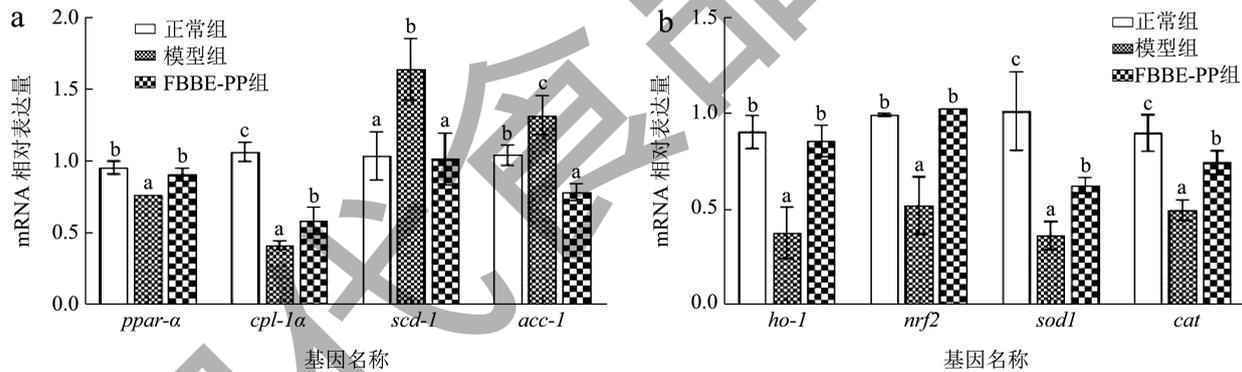


图 5 FBBE-PP 对 HepG2 细胞脂代谢 (a) 及氧化应激 (b) 相关基因表达的影响

Fig.5 The expressions of lipid metabolism (a) and oxidative stress (b) genes in HepG2 cells affected by FBBE-PP

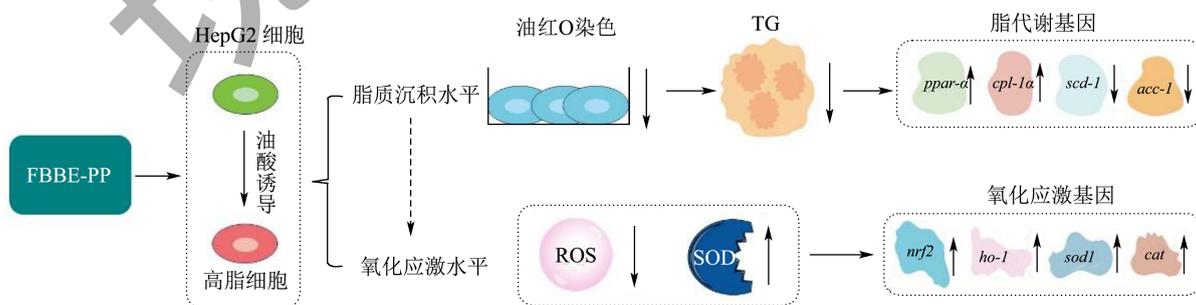


图 6 FBBE-PP 对 HepG2 细胞脂质沉积及氧化应激的缓解作用机制图

Fig.6 The mechanism of FBBE-PP on lipid deposition and oxidative stress in HepG2 cells

3 结论

本文探讨了 *Lp. plantarum* dy-1 发酵对大麦麸皮功能活性的提升效果, 通过油酸诱导 HepG2 建立高脂细胞模型, 分析了发酵大麦麸皮提取物对细胞脂质沉积及氧化应激的调节作用。结果表明, *Lp. plantarum* dy-1 发酵大麦麸皮提取物表现出较好的降脂活性, 而发酵后酚类物质含量的增加可能是功能活性提升的主要原因。如图 6 所示, 进一步研究发现, 多酚组分能够显著降低高脂 HepG2 细胞的甘油三酯水平, 抑制油酸诱导的细胞脂质沉积, 并可通过降低 ROS 含量, 提高 SOD 活性缓解细胞氧化应激; RT-qPCR 分析结果表明, 发酵大麦麸皮中的多酚组分可显著上调细胞脂肪酸氧化相关基因 *ppar-α* 和 *cpt-1α* 的 mRNA 表达水平, 下调脂肪生成基因 *scd-1* 和 *acc-1* 的 mRNA 表达水平; 并上调 *nrf2*、*ho-1*、*sod1* 和 *cat* 等细胞抗氧化应激基因 mRNA 的表达。本研究为大麦加工副产物的微生物转化、利用及其相关健康食品的开发, 提供了一定的研究基础和试验依据。

参考文献

- [1] LEROY F, VUYST L D. Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15 (2): 67-78.
- [2] ZHAO Y S, EWEYS A S, ZHANG J Y, et al. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components [J]. Antioxidants, 2021, 10 (12): 2004.
- [3] PRANOTO Y, ANGGRAHINI S, EFENDI Z. Effect of natural and *Lactobacillus plantarum* fermentation on *in-vitro* protein and starch digestibilities of sorghum flour [J]. Food Bioscience, 2013, 2: 46-52.
- [4] HOLE A S, RUD I, GRIMMER S, et al. Improved bioavailability of dietary phenolic acids in whole grain barley and oat groat following fermentation with probiotic *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus johnsonii*, and *Lactobacillus reuteri* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60 (25): 6369-6375.
- [5] ZHAO Y S, WU X M, WU C, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of fermented barley with *Lactiplantibacillus plantarum* dy-1 [J]. Food Biotechnology, 2022, 36 (3): 266-282.
- [6] ZHANG J Y, WANG P, TAN C, et al. Integrated transcriptomics and metabolomics unravel the metabolic pathway variations for barley β -glucan before and after fermentation with *L. plantarum* DY-1 [J]. Food & Function, 2022, 13 (8): 4302-4314.
- [7] GU Y G, BAI J, ZHANG J Y, et al. Transcriptomics reveals the anti-obesity mechanism of *Lactobacillus plantarum* fermented barley extract [J]. Food Research International, 2022, 157: 111285.
- [8] XIAO X, ZHOU Y R, TAN C, et al. Barley β -glucan resist oxidative stress of *Caenorhabditis elegans* via daf-2/daf-16 pathway [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193 (Pt B): 1021-1031.
- [9] ZHANG J Y, LIU M T, DENG H, et al. Purification and identification of lipid-lowering protein from barley extract after *Lactiplantibacillus plantarum* dy-1 fermentation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70 (45), 14488-14498.
- [10] SHIFERAW TEREFE N, AUGUSTIN M A. Fermentation for tailoring the technological and health related functionality of food products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60 (17): 2887-2913.
- [11] 伍雪梅. 植物乳杆菌发酵大麦麸皮提取物对 HepG2 脂质沉积的缓解作用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [12] EL MANSOURI F, PALMA LOVILLO M, EL FARISSI H, et al. Extraction, analysis of polyphenols and antioxidant properties of morrocan barley seed extracts (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 1896-1902.
- [13] TAO T, ZHANG Q, LIU Z B, et al. *Polygonum cuspidatum* extract exerts antihyperlipidemic effects by regulation of PI3K/AKT/FOXO3 signaling pathway [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2021, 9: 3830671.
- [14] TAHA S, EL ABD M, DE GOBBA C, et al. Antioxidant and antibacterial activities of bioactive peptides in buffalo's yoghurt fermented with different starter cultures [J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26 (5): 1325-1332.
- [15] ZHAO Y S, TONG X M, WU X M, et al. Metabolomics reveal the regulatory effect of polysaccharides from fermented barley bran extract on lipid accumulation in HepG2 cells [J]. Metabolites, 2023, 13 (2): 223.
- [16] LI J Y, BAI J, YUAN J, et al. Heterologous expression and characterization of an endoglucanase from *Lactobacillus plantarum* dy-1 [J]. Food & Function, 2023, 14(8): 3760-3768.
- [17] YAO Y J, XU F R, JU X R, et al. Lipid-lowering effects and intestinal transport of polyphenol extract from digested buckwheat in Caco-2/HepG2 coculture models [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68 (14): 4205-4214.
- [18] PENG J M, WEN W J, WANG R F, et al. The galloyl moiety enhances inhibitory activity of polyphenols against adipogenic differentiation in 3T3-L1 preadipocytes [J].

- Food & Function, 2022, 13 (9): 5275-5286.
- [19] YAO Y J, LI Z F, QIN B W, et al. Evaluation of the intracellular lipid-lowering effect of polyphenols extract from highland barley in HepG2 cells [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13 (1): 454-461.
- [20] DOU J F, WU C E, FAN G J, et al. Insights into the pigment and non-pigment phenolic profile of polyphenol extracts of jujube peel and their antioxidant and lipid-lowering activities [J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102493.
- [21] DUNHAM-SNARY K J, BALLINGER S W. Mitochondrial genetics and obesity: evolutionary adaptation and contemporary disease susceptibility [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2013, 65: 1229-1237.
- [22] CHEN J C, TIAN J J, GE H F, et al. Effects of tetramethylpyrazine from Chinese black vinegar on antioxidant and hypolipidemia activities in HepG2 cells [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 109: 930-940.
- [23] ZHANG J G, HUANG X D, CHENG J H, et al. Effect of *Lactobacillus* (*L. acidophilus* NCIB1899, *L. casei* CRL431, *L. paracasei* LP33) fermentation on free and bound polyphenolic, antioxidant activities in three *Chenopodium quinoa* cultivars [J]. Journal of Food Science, 2023, 88 (6): 2679-2692.
- [24] WANG Q S, LI M, LI X, et al. Protective effect of orange essential oil on the formation of non-alcoholic fatty liver disease caused by high-fat diet [J]. Food & Function, 2022, 13 (2): 933-943.
- [25] CHENG Q, LI Y W, YANG C F, et al. Methyl ferulic acid attenuates ethanol-induced hepatic steatosis by regulating AMPK and FoxO1 Pathways in Rats and L-02 cells [J]. Chemico-Biological Interactions, 2018, 291: 180-189.
- [26] HE F, RU X L, WEN T. NRF2, a transcription factor for stress response and beyond [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(13): 4777.
- [27] OGINO N, MIYAGAWA K, NAGAOKA K, et al. Role of HO-1 against saturated fatty acid-Induced oxidative stress in hepatocytes [J]. Nutrients, 2021, 13(3): 993.
- [28] ZHAO L, YANG H Q, XU M L, et al. Stevia residue extract ameliorates oxidative stress in d-galactose-induced aging mice via Akt/Nrf2/HO-1 pathway [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 52: 587-595.
- [29] WANG Y X, CHEN X L, HUANG Z Q, et al. Dietary ferulic acid supplementation improves antioxidant capacity and lipid metabolism in weaned piglets [J]. Nutrients, 2020, 12(12): 3811.