

灰树花醇提物对秀丽隐杆线虫的抗氧化及降脂作用

赖美英¹, 许欢怡¹, 李泉岑¹, 刘斌^{1,2,3}, 曾峰^{1,2*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002) (2. 福建省亚热带果蔬加工工程技术研究中心, 福建福州 350002) (3. 福建农林大学国家菌草工程技术研究中心, 福建福州 350002)

摘要: 为研究灰树花醇提物的抗氧化及降脂作用, 该研究首先测定了灰树花醇提物的总糖、蛋白、多酚和三萜含量, 接着利用体外抗氧化实验和秀丽隐杆线虫模型分析其抗氧化能力。此外, 通过油红 O 染色观察线虫体内脂质沉积情况, 同时测定 TG 浓度和 LPS 活力探究其降脂潜力。结果发现灰树花醇提物主要以蛋白质为主, 含量为 233.67 mg/g; 其对 DPPH、ABTS⁺ 和羟基自由基均有极显著清除效果, IC₅₀ 值分别为 3.25、0.38 和 1.73 mg/mL; 与空白组相比, 经灰树花醇提物干预的高剂量组的线虫体内抗氧化酶 CAT、T-SOD 和 GSH-Px 活力以及 LPS 活力分别极显著提升了 4.33、4.88、2.28 和 3.93 倍; 线虫脂肪沉积水平、MDA 和 TG 含量显著下降, 高剂量组的 MDA、TG 水平分别下降了 55.62% 和 50.66%。综上, 灰树花醇提物具有体外抗氧化能力, 对秀丽隐杆线虫体内抗氧化酶活力具有提升作用; 降低线虫体内的脂质沉积水平和 TG 浓度, 表明其具有良好的降脂效果。该研究可为灰树花高值化利用提供理论依据。

关键词: 灰树花醇提物; 秀丽隐杆线虫; 抗氧化; 降脂

文章编号: 1673-9078(2025)07-117-124

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0497

Antioxidant and Lipid-lowering Effects of the Alcohol Extract of *Grifola frondosa* in *Caenorhabditis elegans*

LAI Meiyi¹, XU Huanyi¹, LI Quancen¹, LIU Bin^{1,2,3}, ZENG Feng^{1,2*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China) (2. Fujian Province Sub-tropical Fruit and Vegetable Processing Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350002, China) (3. China National Engineering Research Center of JUNCAO Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To evaluate the antioxidant and lipid-lowering effects of the alcohol extract of *Grifola frondosa* (*G. frondosa*), the total sugar, protein, polyphenol, and triterpene contents of the alcohol extract were determined, and the antioxidant capacity was subsequently analyzed in *in vitro* antioxidant assays and *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) models. In addition, lipid deposition in *C. elegans* was observed by Oil Red O staining, and the TG concentration and LPS activity were measured to explore the lipid-lowering potential of the alcohol extract. The results show that the alcohol extract of *G. frondosa* mainly consists of proteins, with a total protein content of 233.67 mg/g. The alcohol extract demonstrates significant DPPH, ABTS,

引文格式:

赖美英, 许欢怡, 李泉岑, 等. 灰树花醇提物对秀丽隐杆线虫的抗氧化及降脂作用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 117-124.

LAI Meiyi, XU Huanyi, LI Quancen, et al. Antioxidant and lipid-lowering effects of the alcohol extract of *Grifola frondosa* in *Caenorhabditis elegans* [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 117-124.

收稿日期: 2024-04-16

基金项目: 福建省科技计划项目 (2023N3004)

作者简介: 赖美英 (1999-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: lmy304687073@163.com

通讯作者: 曾峰 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品与分子营养学, E-mail: fengzengfz@163.com

and hydroxyl radical scavenging activities, and the corresponding IC_{50} values are 3.25, 0.38, and 1.73 mg/mL, respectively. Compared with those of the blank group, the CAT, T-SOD, GSH-Px, and LPS activities in the high-dose treatment group significantly increase by 4.33-, 4.88-, 2.28-, and 3.93-fold, respectively. Furthermore, lipid deposition, as well as the MDA and TG levels, decreases significantly. More specifically, the levels of MDA and TG in the high-dose group reduce by 55.62% and 50.66%, respectively. In conclusion, the alcohol extract of *G. frondosa* exhibits *in vitro* antioxidant capacity and can enhance the antioxidant enzyme activity in *C. elegans*. It also reduces lipid deposition and the TG concentration in *C. elegans*, indicating that it has a good lipid-lowering effect. This study provides a theoretical basis for the high-value utilization of *G. frondosa*.

Key words: lcohol extract of *Grifola frondosa*; *Caenorhabditis elegans*; antioxidants; lipid-lowering effect

灰树花 (*Grifola frondosa*, *G. frondosa*), 又称舞茸, 为食药两用真菌。其干品形态似珊瑚状, 质感脆硬, 色呈灰褐, 由于具有多糖、多酚、氨基酸、核酸、矿物质等功效成分, 自古以来, 在亚洲地区被用于促进健康和治疗疾病, 被视为具有巨大经济开发前景的真菌之一^[1-3]。

多糖和蛋白质均是食用菌中重要的活性成分, 两者都具有多种生物活性, 如抗氧化、免疫调节、抗炎等, 另外, 食用菌三萜、多酚等次级代谢产物是抗氧化剂的重要来源^[4,5]。在灰树花功效成分研究中, 灰树花水提物主要包含多糖类成分, 而醇提物主要是脂溶性或醇溶性成分, 如萜类、酚类、生物碱、油脂或醇溶性多糖等, 这些成分在水提物中可能含量较低或无法提取。两者提取的活性成分在极性上存在差异, 相对于水提法, 醇提法可以提取包括极性、非极性和弱极性化合物在内的多种成分。此外, 在灰树花的药理作用研究上, 灰树花水提物在抗肿瘤、调节免疫、调节血脂血糖、抗病毒、抗氧化、改善脂质代谢等药理作用有较广泛研究^[6,7], 而灰树花醇提物的研究却相对较少。

熊雯宇等^[8]采用超声辅助 $\varphi=95\%$ 乙醇提取灰树花子实体获得多酚及三萜, 经皮尔逊相关性分析后发现过氧化氢 (H_2O_2) 自由基、超氧阴离子 (O_2^-) 自由基的清除效果以及对 EV71 病毒的抑制能力, 与多酚类成分的质量浓度之间存在显著的正相关; 此外, 何君强等^[9]发现灰树花正丁醇萃取物中含有 11.58% 亚油酸甲酯, 该成分与 α -葡萄糖苷酶的表面活性位点结合具有抑制效果, 说明灰树花具有潜在的降血糖和抗病毒作用。Wang 等^[10]采用 $\varphi=55\%$ 乙醇提取灰树花子实体, 发现其醇提物通过调节相关基因和信号通路的表达, 实现逆转血清葡萄糖、血脂和肝脏异常指标, 改善肠道菌群组成, 调节肝脏脂质代谢紊乱的目的。综上, 灰树花醇提物含有多种生物活性成分, 具有抗氧化、抗病毒、降血糖和

调节脂质代谢等潜在药理作用, 可能还存在其他作用未被挖掘。因此, 本文以灰树花醇提物为受试样品, 秀丽隐杆线虫为生物模型, 进行了体内外抗氧化以及体内降脂作用的研究。以期为灰树花活性物质的高价值利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

灰树花干品由福建农林大学国家菌草工程技术研究中心提供; 野生 N2 型秀丽隐杆线虫由本课题组传代培养获得; 二喹啉甲酸 (Bicinchoninic Acid, BCA)、甘油三酯 (Triglycerides, TG)、脂肪酶 (Lipase, LPS)、谷胱甘肽过氧化物酶 (Glutathione Peroxidase, GSH-Px)、总超氧化物歧化酶 (Total Superoxide Dismutase, T-SOD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 试剂盒, 南京建成生物工程公司; 2,2'-联氮吡啶-N,N'-二基-3-乙基苯并噻唑-6-磺酸盐 (2,2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS) 和 2,2'-联苯基-1-苦基肼基 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical, DPPH), 上海源叶生物科技有限公司; Western 细胞裂解液, 碧云天生物技术有限公司; 油红 O 染色液, 上海源叶生物科技有限公司; 其余试剂均为国产分析纯。SpectraMax® i3x 酶标仪, 美谷分子仪器 (上海) 有限公司; SMZ18 体视显微镜, 尼康仪器 (上海) 有限公司。

1.2 灰树花醇提物的制备

灰树花超微粉过 80 目筛 → 称取 20 g 灰树花粉末 → 以料液比 1:40 (g/mL) 加入 $\varphi=50\%$ 乙醇混合均匀 → 超声辅助提取法 (240 W, 40 min, 75 °C) → 离心 (5 000 r/min, 15 min), 上清液即为提取液 → 浓缩 (合适转速, 50 °C) → 冻干 → 密封保存备用

1.3 灰树花醇提物的组成含量测定

选择苯酚-硫酸法测定灰树花醇提物的总糖含量；BCA 试剂盒测定其总蛋白含量；福林-酚试剂法测定其总多酚含量；分光光度法测定其总三萜含量。以上方法参考文献^[11]并略加修改。

1.4 灰树花醇提物的体外抗氧化活性测定

1.4.1 对DPPH自由基的清除作用

将 1.2 的醇提物冻干粉用水溶解制成质量浓度分别为 3、5、7、9、11 mg/mL 的样品溶液，以无水乙醇配制 0.4 mmol/L 的 DPPH 自由基溶液。分别吸取 100 μ L 的样品溶液和等体积的 DPPH 溶液混合，避光静置 30 min，在 517 nm 处测定吸光度。以相同质量浓度梯度的等体积 Vc 溶液替代样品溶液作为阳性对照组。以 100 μ L 无水乙醇代替 DPPH 溶液作为对照组。以 100 μ L 无水乙醇代替样品溶液作为空白组。每个质量浓度设置三个平行，按式（1）计算灰树花醇提物的 DPPH 自由基清除率并绘制曲线，同时计算半抑制质量浓度。

$$R = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\% \quad (1)$$

式中：

R ——DPPH 自由基清除率，%；

A_1 ——样品组吸光度；

A_2 ——对照组吸光度；

A_0 ——空白组吸光度。

1.4.2 对ABTS⁺自由基的清除作用

将 1.2 的灰树花醇提物配制成质量浓度分别为 2、3、4、5、6 mg/mL 的样品溶液，ABTS 工作液由 PBS（Phosphate Buffered Saline, PBS）缓冲液稀释 ABTS 母液制得，其中工作液要求稀释至在 734 nm 处测得吸光度为 0.7。取 50 μ L 样品溶液于 96 孔板中 30 $^{\circ}$ C 水浴 3 min，迅速加入 150 μ L ABTS 工作液，混匀，再放入 30 $^{\circ}$ C 水浴 6 min，在波长 734 nm 处测定吸光度。设置相同浓度梯度的等体积 Vc 溶液替代样品溶液作为阳性对照组。以 150 μ L 磷酸盐缓冲液 PBS 代替 ABTS 工作液作为对照组。以 50 μ L PBS 代替样品溶液作为空白组。每个质量浓度要求三组平行。利用公式（2）计算其对 ABTS⁺ 自由基的清除率以及半抑制质量浓度，同时绘制成曲线。

$$R = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

R ——ABTS⁺ 自由基清除率，%；

A_1 ——样品组吸光度；

A_2 ——对照组吸光度；

A_0 ——空白组吸光度。

1.4.3 对羟基自由基的清除作用

将 1.2 的灰树花醇提物配制成质量浓度分别为 0.5、1、1.5、2、2.5 mg/mL 的样品溶液，吸取 500 μ L 的样品溶液，接着依次加入 250 μ L 浓度为 1.5 mmol/L 的 FeSO₄ 溶液和 115 μ L 6.7 mmol/L 的 H₂O₂ 溶液混匀，在 37 $^{\circ}$ C 中水浴 10 min，加入 75 μ L 的 20 mmol/L 水杨酸溶液，继续 37 $^{\circ}$ C 水浴，30 min 后在 562 nm 处测定吸光度。以同样质量浓度梯度的等体积 Vc 溶液为阳性对照组。以 500 μ L 超纯水代替样品溶液作为空白组。以 75 μ L 超纯水代替水杨酸溶液作为对照组。要求分别做三组平行。选择公式（3）计算其对羟基自由基的清除率以及半抑制质量浓度，同时绘制成曲线。

$$R = (1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}) \times 100\% \quad (3)$$

式中：

R ——羟基自由基清除率，%；

A_1 ——样品组吸光度；

A_2 ——对照组吸光度；

A_0 ——空白组吸光度。

1.5 灰树花醇提物对秀丽隐杆线虫体内抗氧化和降脂能力测定

1.5.1 线虫同步化与分组

选择本课题组线虫传代培养中含有大量产卵期雌雄同体线虫的培养基，按照文献^[12]的方法并稍作修改培养成 L4 期幼虫，即完成同期化。

在 OP50 培养液的基础上加入灰树花醇提物冻干粉配制成灰树花醇提物培养液。将线虫分为空白、低剂量、中剂量和高剂量组别，线虫生长培养基（Nematode Growth Medium, NGM）更换时间为每日一次，并按组别依次分别给予线虫 100 μ L 的 OP50 培养液、0.25、0.5 以及 1.0 mg/mL 的灰树花醇提物培养液，72 h 后收集虫体，用于后续实验。

1.5.2 线虫体内抗氧化酶测定

取 1.5.1 收集的 4 组虫体（每组 $n=30$ ），用 M9 缓冲液清洗 3 次，转入 5 mL EP 管，弃上清，之后

每板加入 1 mL 的细胞裂解缓冲液, 在冰上孵育 1 h, 并于冰浴中进行超声破碎每管 2 min, 匀浆处理后在 3 000 r/min 下离心 5 min, 取上清液, 按照试剂盒说明书分别测定线虫体内蛋白浓度、T-SOD、CAT、GSH-Px 和 MDA 水平。

1.5.3 线虫体内降脂能力测定

1.5.3.1 油红O染色

取 1.5.1 收集的 4 组虫体 (每组 $n=30$), 线虫清洗步骤同 1.5.2, 在 3 000 r/min 下离心 5 min, 弃上清, 加 200 μ L 油红 O 染色液染色 2 h, 离心, 取沉淀, 用缓冲液清洗多余染液, 200 μ L 盐酸左旋咪唑 (6 mg/mL) 迷晕, 30 min 后将每组线虫移至干净培养皿中, 采用体视显微镜的普通光源进行拍照观察。

1.5.3.2 甘油三酯

参照文献^[13]的方法, 并进行略微调整。线虫培养方式同 1.5.1, 清洗方式同 1.5.2, 收集线虫至 5 mL EP 管后, 旋涡混匀, 静置弃上清, 继续重复清洗 3 次, 收集沉淀。接着加入 200 μ L 预冷的细胞裂解液再冰浴裂解孵育 1 h, 随后破碎和离心处理同 1.5.2, 收集上清, 使用 BCA 蛋白定量试剂盒测定蛋白浓度, 并采用 TG 试剂盒测定 TG 浓度。

1.5.3.3 脂肪酶

前期线虫培养同 1.5.1, 后续处理步骤同 1.5.3.2 进行, 收集线虫沉淀。使用蛋白试剂盒测定线虫蛋白浓度, 并按照 LPS 试剂盒测定脂肪酶活力。

1.5.4 数据分析

采用 Origin 2022、Image J 和 SPSS R 26.0 软件进行统计分析后, 用平均值 $\pm$ 标准差表示结果, 数据分析采用单因素方差分析。 $P<0.05$ 表示显著差异, $P<0.01$ 表示极显著差异。

2 结果与讨论

2.1 灰树花醇提物的总糖、总蛋白和总多酚含量

采用不同浓度乙醇提取灰树花样品得到的活性成分存在差异。熊雯宇等^[8]研究了由不同浓度乙醇提取灰树花的主要活性成分及其含量, 结果发现灰树花 95% (ϕ) 乙醇提取物中多酚和三萜含量最高, 分别为 0.04% 和 1.82%; 灰树花 55% (ϕ) 乙醇提取物中多糖和蛋白质含量最高, 分别为 33.08% 和

17.45%。本研究以 $\phi=50\%$ 乙醇提取灰树花, 其醇提物的总糖、总蛋白、总多酚和总三萜的含量分别为 155.92、233.67、5.56 和 51.8 mg/g。由此可知, 灰树花醇提物以蛋白质含量最高, 说明在其活性成分中蛋白质组分占比最大。灰树花醇提物的化学成分占比结果与熊雯宇的研究结果基本一致, 但具体含量比例不同, 说明乙醇提取溶剂体积分数的相应变化能溶出不同极性的化学成分。

2.2 灰树花醇提物的体外自由基清除能力

DPPH、ABTS⁺ 和羟基自由基清除率是三种不同的体外实验指标, 众多研究评估抗氧化能力时, 常采用自由基清除效果作为衡量指标。吕旭聪等^[14]通过分析自由基清除率和总还原力的数据, 得出 40% 乙醇洗脱物的灰树花醇提物多酚组分具有最佳抗氧化作用的结论。Dubost 等^[15]对灰树花等栽培菌中的多酚含量与氧自由基吸收能力的相关性进行了分析, 发现灰树花多酚具有显著的抗氧化能力。相似地, 李燕^[16]根据自由基清除效果和总还原力发现灰树花乙酸乙酯提取物具有较好的抗氧化活性。通过确定样品对自由基的吸收能力强弱可以一定程度上反映样品的抗氧化能力水平。

图 1a 所示, 在 3~11 mg/mL 的质量浓度范围内, 灰树花醇提物的 DPPH 自由基清除能力随剂量增加而增强。特别地, 当质量浓度为 11 mg/mL 时醇提物达到了 94.65% 的 DPPH 清除效果, 趋近但仍低于 Vc 在同样质量浓度下的 95.49% 的清除效果。此外, 灰树花醇提物对 DPPH 自由基的 IC₅₀ 为 3.25 mg/mL。如图 1b 所示, 在 0.2~0.6 mg/mL 质量浓度范围内的灰树花醇提物, 其 ABTS⁺ 自由基清除能力与剂量呈依赖效应。质量浓度为 0.6 mg/mL 的灰树花醇提物的 ABTS⁺ 自由基清除率可达 59.16%, 但此水平尚未达到同样质量浓度下 Vc 所展现的 99.70% 的清除效果。同时, 灰树花醇提物对 ABTS⁺ 自由基的 IC₅₀ 为 0.38 mg/mL。如图 1c 可知, 质量浓度在 0.5~2.5 mg/mL 范围内的灰树花醇提物以量效关系影响着羟基自由基清除率。当灰树花醇提物质量浓度为 2.5 mg/mL 时, 其对羟基自由基的清除率达 88.34%, 但仍低于同样质量浓度下 Vc 的清除率 (98.80%)。此外, 灰树花醇提物对羟基自由基的 IC₅₀ 为 1.73 mg/mL。通过观察图 1 曲线以及对比灰树花醇提物对三种自由基的 IC₅₀ 值大小, 灰树花醇提物以量效关系呈现出较好的抗氧化活性, 其中

对 $ABTS^+$ 清除效果最好。由 2.1 可知，其抗氧化特性由蛋白质和多糖等多种化学成分赋予，这些成分可能通过发生相互作用促进清除自由基功能。多酚结构上存在酚羟基数量多，因此本身具有很强的抗氧化性。蛋白质可以通过非共价键与多酚、三萜等其他化学成分组合，当多酚、三萜与蛋白质结合时，蛋白质的结构特性发生改变，进而可能提高蛋白质的抗氧化能力^[17]。也可能是其中的活性成分（如多酚）通过它们的羟基捕捉自由基，直接与自由基发生反应并中和它们实现增强灰树花醇提物的抗氧化能力。

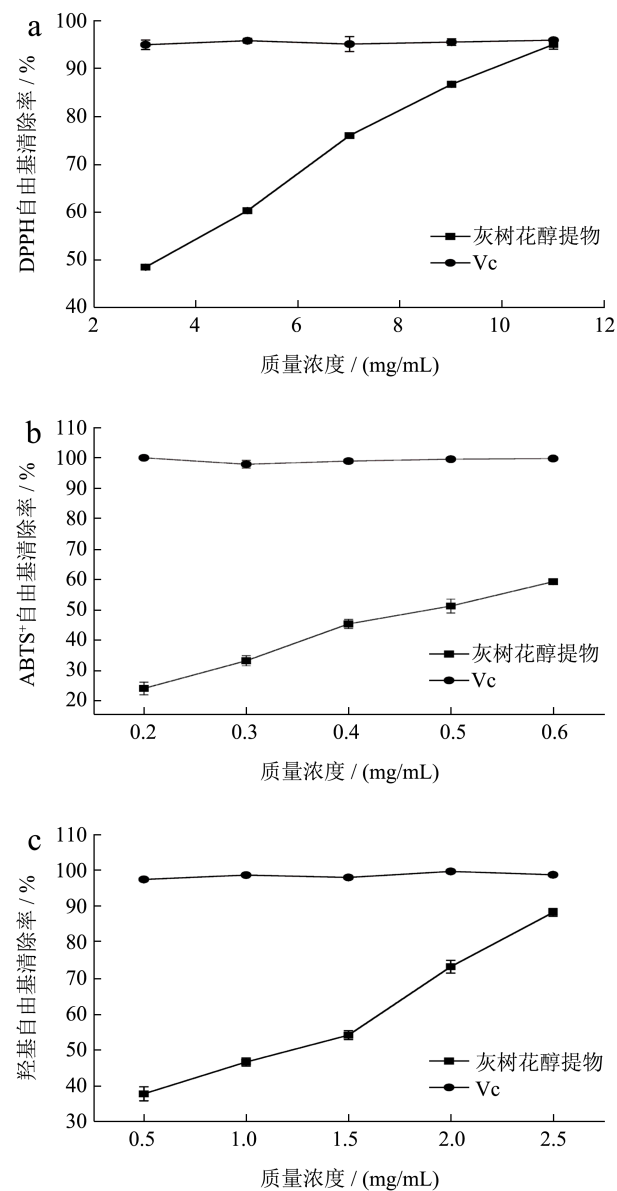


图 1 灰树花醇提物对 DPPH 自由基、 $ABTS^+$ 自由基和羟基自由基的清除率

Fig.1 The scavenging rate of alcohol extract from *G. frondosa* on DPPH, $ABTS^+$ and hydroxyl radical

2.3 灰树花醇提物的体内抗氧化和降脂研究

2.3.1 体内抗氧化酶测定

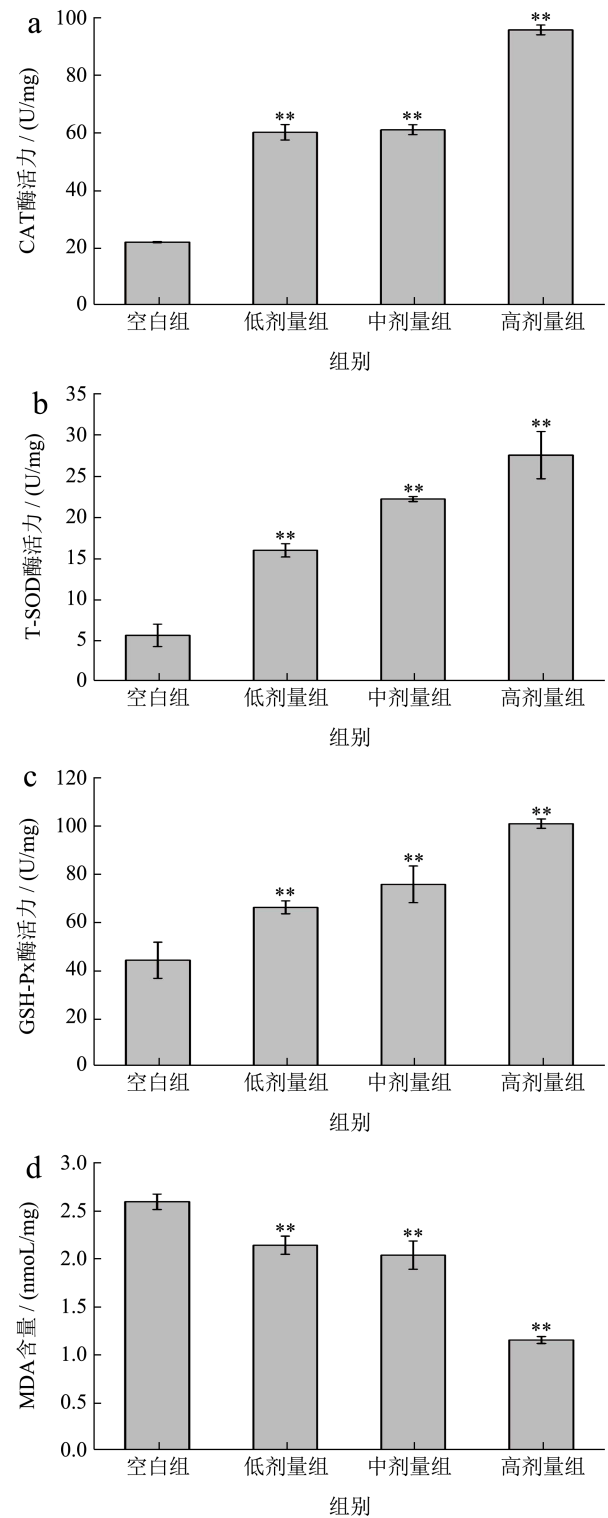


图 2 灰树花醇提物对秀丽隐杆线虫体内抗氧化酶活力的影响

Fig.2 Effects of alcohol extract from *G. frondosa* on antioxidant enzyme activities in *C. elegans*

注：* 相同指标下与空白组相比差异极显著 ($P<0.05$), ** 相同指标下与空白组相比差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

CAT、SOD、GSH-Px 和 MDA 水平在生物体内抵抗外源物质和环境的应激发挥着重要作用，抗氧化酶活力的提高有助于维持线虫体内的氧化平衡^[18]。如图 2 所示，线虫体内 CAT、T-SOD、GSH-Px 酶活力和 MDA 水平的变化表明灰树花醇提物具有抗氧化能力。与空白组相比，CAT、SOD 及 GSH-Px 酶活力均有极显著上升 ($P<0.01$)，同时 MDA 水平极显著降低 ($P<0.01$)。灰树花醇提物低、中、高剂量组的 CAT 酶活力分别为空白组的 2.72、2.76 和 4.33 倍；T-SOD 酶活力分别是空白组的 2.83、3.94 和 4.88 倍；GSH-Px 活力分别是空白组的 1.49、1.71 和 2.28 倍；MDA 水平分别下降了 17.5%、21.50% 和 55.62%。以上结果表明灰树花醇提物干预后对 T-SOD 活力改善效果更佳，其中灰树花高剂量组影响最大，并以剂量效应关系发挥抗氧化作用。灰树花醇提物所含的化学成分通过增加抗氧化酶活性和减少脂质过氧化产物 MDA 的生成，以此提高细胞的抗氧化防御能力和保护细胞膜的完整性，从而实现抗氧化能力的增强。

2.3.2 油红O染色观察结果

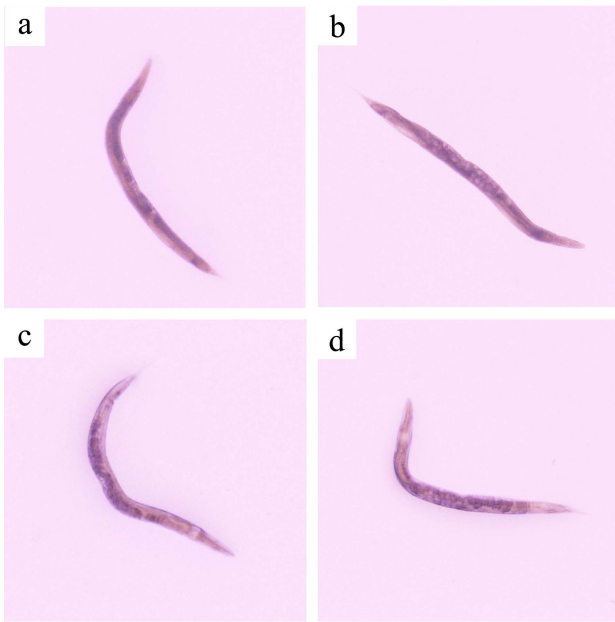


图 3 秀丽隐杆线虫油红 O 染色图 (5×)

Fig.3 Photographs of oil red O staining (5×)

注：a. 空白组；b. 低剂量组；c. 中剂量组；d. 高剂量组。

盐酸左旋咪唑固定线虫后进行油红 O 染色，染液具有溶脂能力，线虫肠道内沉积的脂肪先被溶解，随后染液与 TG 发生结合，形成红色小脂滴^[19]。如图 3 所示，通过体视显微镜拍摄的线虫体脂染色情况显示，空白组整体面积受到染液覆

盖，颜色最深。随着灰树花醇提物浓度的递升，低、中、高剂量组的染色面积逐渐减小，着色也由深变浅，尤其是中、高剂量组相较于空白组其效果有明显改善。染色面积的大小通常与细胞内脂质含量成正比，染色面积的缩小表明线虫体内脂质含量降低。此外，着色的深浅通常也与光密度值成正比，光密度值表示物质对光的吸收和散射能力，着色越深的区域它的光密度值越大。图 4 所示的是线虫染色面积下的相对光密度值变化，在质量浓度为 0.5 mg/mL 时，线虫体内脂质沉淀的改善效果最佳。以着色最深的空白组的光密度值作为参照，低、中、高剂量组线虫的相对光密度值分别是空白组的 57%、27%、28%。尤其是中剂量组线虫体内的脂质沉淀极显著减少了 73% ($P<0.01$)。整体而言，灰树花醇提物能明显改善线虫体内脂肪积累情况。

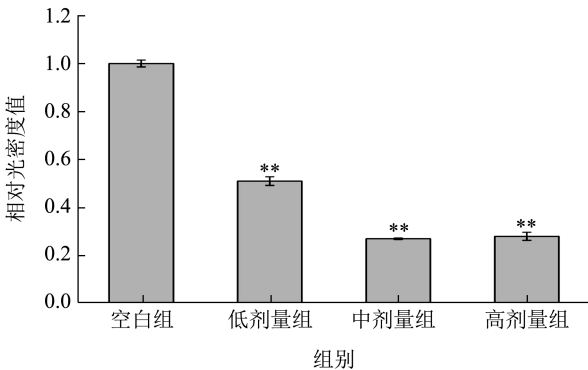


图 4 线虫油红 O 染色后的相对光密度值

Fig.4 Relative optical density after oil red O staining

2.3.3 甘油三酯浓度

线虫基因组缺乏合成胆固醇的一些关键基因，致使体内无法合成胆固醇，脂质主要以 TG 的形式存在于肠道中^[20]，因此以 TG 浓度为脂质代谢紊乱的鉴定标准。TG 浓度的变化可以进一步证明灰树花醇提物的降脂作用。由图 5 可知，对照空白组，低剂量的灰树花醇提物干预的线虫体内 TG 浓度显著降低 ($P<0.05$)，中、高剂量的灰树花醇提物干预的线虫体内 TG 浓度极显著降低 ($P<0.01$)，其中灰树花高剂量组的 TG 浓度 (0.14 mmol/L) 下降至空白组 (0.28 mmol/L) 的一半。以上结果可知灰树花醇提物以剂量依赖式降低线虫体内的脂质积累，其机理可能是灰树花醇提物中的化学成分如蛋白质、多糖和多酚通过直接降低 TG 在线虫体内的含量以及强分解脂肪，减少线虫的脂质吸收和积累，促进其脂质排泄，从而发挥调节脂质

代谢紊乱的作用。

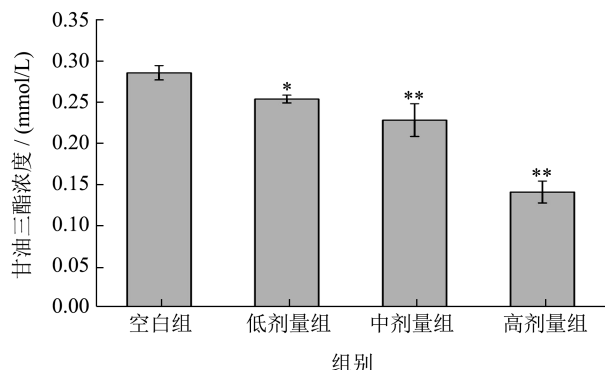


图 5 灰树花醇提物对线虫体内甘油三酯浓度的影响

Fig.5 Effect of alcohol extract from *G. frondosa* on TG content in *C. elegans*

2.3.4 脂肪酶活力

甘油三酯的水解速度与脂肪酶活力有关^[21], 灰树花醇提物干预后对脂肪酶活力的影响如图 6 所示, 灰树花醇提物低、中、高剂量浓度干预下脂肪酶活力分别为 120.85、175.57、225.30 U/g, 脂肪酶活力分别提高至空白组的 2.11、3.06 和 3.93 倍。除灰树花醇提物低剂量组外, 各组酶活力有极显著提高 ($P<0.01$)。LPS 酶活力的显著上升说明了灰树花醇提物可能通过激活或增强脂肪分解过程中的关键酶类, 促进 TG 的水解, 进而降低细胞内的脂质积累。同时, LPS 酶活力的增加, 灰树花醇提物可能产生对抗低度炎症反应, 进而对脂质代谢产生积极影响。此外, 灰树花醇提物显著的抗氧化能力也可能影响到脂质代谢和改善脂肪沉积。自由基含量的显著减少影响自由基引发的脂质过氧化反应, 造成脂质过氧化产物 MDA 含量的显著下降的结果。脂质过氧化的降低有助于维持良好的脂质代谢状态, 最终达到降脂效果。

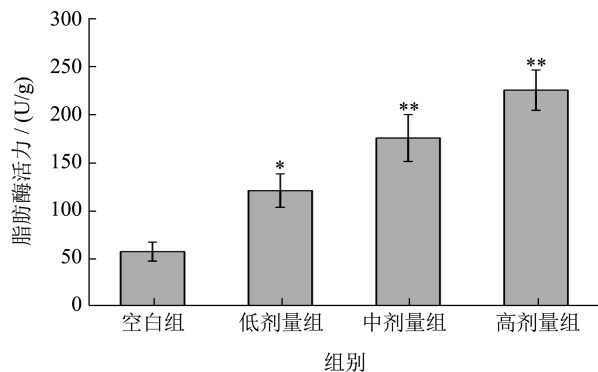


图 6 灰树花醇提物对线虫脂肪酶活力的影响

Fig.6 Effect of alcohol extract from *G. frondosa* on LPS activities in *C. elegans*

3 结论

灰树花醇提物主要以蛋白质为主, 含量为 233.67 mg/g。体内、外测定抗氧化结果表明, 灰树花醇提物对 DPPH、ABTS⁺ 和羟基三种自由基均有极显著清除效果, 最高清除率分别至 94.65%、59.16% 和 88.34%, IC₅₀ 值分别为 3.25、0.38 和 1.73 mg/mL; 与空白组相比, 经高剂量灰树花醇提物干预的线虫体内抗氧化酶 CAT、T-SOD 和 GSH-Px 酶活力分别极显著提升了 4.33、4.88、2.28 倍, MDA 含量下降了 55.62%。综上, 灰树花醇提物对 ABTS⁺ 自由基的清除效果最佳, 对 GSH-Px 活力的改善效果更好。因此, 灰树花醇提物具备良好的抗氧化能力。此外, 随着灰树花醇提物剂量浓度的提高, LPS 活力有效提升了 3.93 倍, 酶活力增强促进 TG 溶解, 使得 TG 水平下降了 50.66%, 线虫体内沉积脂质大量减少, 致使线虫体内脂质代谢紊乱趋于平衡, 表明了灰树花醇提物改善线虫体内脂质沉积, 具有降脂能力。

参考文献

- [1] SEERAM N P. Berries and human health: research highlights from the fifth biennial berry health benefits symposium [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(18): 3839-3841.
- [2] ASYAKINA L, ATUCHIN V, DROZDOVA M, et al. *Ex vivo* and *in vitro* antiaging and antioxidant extract activity of the *Amelanchier ovalis* from Siberia [J]. International Journal of Molecular Science, 2022, 23: 15156.
- [3] LEE J, YOO D, JOO D H, et al. Anti-inflammatory effects of *Amelanchier asiatica* fruits ethanol extract [J]. Journal of Society of Cosmetic Scientists of Korea, 2017, 43: 19-26.
- [4] SOFIA S A, HELENA A, MANUELA E P. The health-promoting potential of edible mushroom proteins [J]. Current Pharmaceutical Design, 2023, 29(11): 804-823.
- [5] YILDIZ O, CAN Z, LAGHARI A Q, et al. Wild edible mushrooms as a natural source of phenolics and antioxidants [J]. Journal of Food Biochemistry, 2015, 39(2): 129-208.
- [6] ZENGIN G, DIUZHEVA A, JEKO J, et al. HPLC-MS/MS-based metabolic profiling and pharmacological properties of extracts and infusion obtained from *Amelanchier parviflora* var. *dentata* [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 124: 699-706.
- [7] ZHANG A J, RIMANDO A M, FISH W, et al. Serviceberry [*Amelanchier alnifolia* nutt. ex. m. roem (rosaceae)] leaf extract inhibits mammalian α -glucosidase

- activity and suppresses postprandial glycemic response in a mouse model of diet-induced obesity and hyperglycemia [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2012, 143: 481-487.
- [8] 熊雯宇,何君强,汤丹琳,等.灰树花不同浓度醇提物的活性成分分析及抗氧化、抗EV71病毒的作用研究[J].*福建农业学报*,2023,38(4):497-505.
- [9] 何君强,熊雯宇,黄莹,等.灰树花醇提物对 α -葡萄糖苷酶和EV71的抑制作用及其活性成分分析[J].*福建农林大学学报(自然科学版)*,2023,52(1):89-96.
- [10] WANG C E, ZENG F, LIU Y L, et al. Coumarin-rich *Grifola frondosa* ethanol extract alleviate lipid metabolism disorders and modulates intestinal flora compositions of high-fat diet rats [J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 85: 104649.
- [11] 肖媚方,陈欣彤,蔡雯雯,等.竹荪水提物抗氧化及改善秀丽隐杆线虫脂质代谢作用[J].*食品科学*,2022,43(19):191-199.
- [12] 倪彩新,金星,周炜,等.利用线虫模型评价乳酸菌体内抗氧化能力及其与体外抗氧化参数的对比[J].*食品与发酵工业*,2019,45(3):21-27.
- [13] SANDHU A, SINGH V. Total triglyceride quantification in *Caenorhabditis elegans* [J]. *Bio-protocol*, 2020, 10(22): e3819.
- [14] 吕旭聪,贾瑞博,李燕,等.灰树花抗氧化活性多酚的提取纯化及其鉴定[J].*中国酿造*,2016,35(3):74-79.
- [15] DUBOST N J, OU B, BEELMAN R B. Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity [J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(2): 727-735.
- [16] 李燕.灰树花活性组分改善脂质代谢紊乱作用研究[D].福州:福建农林大学,2021.
- [17] SUN X H, ROGHAYEH AMINI S, CHIBUIKE C U. Recent advances in protein-polyphenol interactions focusing on structural properties related to antioxidant activities [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 45: 100840.
- [18] ZHAO L, GUO D, LIN J, et al. Responses of catalase and superoxide dismutase to low-dose quantum dots on molecular and cellular levels [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 181: 388-394.
- [19] 屈长青,李东伟,朱茂英.一种改进的培养脂肪细胞染色法[J].*中国组织化学与细胞化学杂志*,2008,3:329-330.
- [20] 李萍,米生权,冯亚芳,等.姜黄素对秀丽隐杆线虫降脂及抗氧化保护作用[J].*食品工业科技*,2017,38(14):289-293.
- [21] CHANDAK P G, RADOVIC B, AFLAKI E, et al. Efficient phagocytosis requires triacylglycerol hydrolysis by adipose triglyceride lipase [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2010, 285(26): 20192-20201.