

富含麦角甾醇的香菇柄提取物调节大鼠脂质代谢

隋嘉伟¹, 崔丹丹¹, 王惺雅¹, 艾孜买提江·艾则孜¹, 朱淑云¹, 朱建华², 高晓余³, 何文森^{1*}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013) (2. 韶关学院广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室, 广东韶关 512000) (3. 云南农业大学云南省精准营养与个性化食品制造重点实验室, 云南昆明 650201)

摘要: 为明确富含麦角甾醇的香菇柄提取物对脂质代谢的影响, 该文首先采用高效液相色谱法分析了香菇菌盖和菌柄中麦角甾醇的含量, 随后在高胆固醇饮食诱导的大鼠模型中进一步考察了菌柄的正己烷提取物 (SEHE) 和甲醇/二氯甲烷提取物 (SEMD) 对大鼠血脂、肝脏脂质及粪便脂质的调节作用。结果显示, 香菇菌盖中的麦角甾醇含量为 $7.82 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于菌柄的 $5.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在两种菌柄提取物中, SEHE 的麦角甾醇含量为 20.31% (m/m), 而 SEMD 则为 6.12% (m/m)。动物实验表明, SEHE 和 SEMD 均能显著降低大鼠血清中的低密度脂蛋白胆固醇 (Low-Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C) 水平, 降幅分别为 51.02% ($P<0.05$) 和 58.34% ($P<0.05$), 同时有效降低 LDL-C/ 高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C) 比值, 降幅分别为 54.61% ($P<0.05$) 和 53.04% ($P<0.05$)。这两种提取物还能减少大鼠肝脏中的胆固醇含量 (-19.31% , $P<0.05$; -23.73% , $P<0.05$) 和甘油三酯含量 (-9.82% , $P=0.11$; -24.83% , $P<0.05$)。此外, SEMD 还能显著降低大鼠血清中的总胆固醇 (Total Cholesterol, TC) 水平 (-13.31% , $P<0.05$)。上述结果表明, 两种菌柄提取物均能有效调节大鼠脂质代谢, 具有作为预防心血管疾病的功能性食品成分的潜力。

关键词: 香菇菌柄提取物; 脂质代谢; 血脂; 麦角甾醇; 食用菌

文章编号: 1673-9078(2026)02-40-49

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1828

Regulation of Lipid Metabolism in Rats using Ergosterol-rich

Lentinus edodes Stalk Extracts

SUI Jiawei¹, CUI Dandan¹, WANG Xingya¹, AZMATJAN·Ezz¹, ZHU Shuyun¹, ZHU Jianhua², GAO Xiaoyu³, HE Wensen^{1*}

(1.School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China) (2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region, Shaoguan University, Shaoguan 512000, China)(3.Yunnan Key Laboratory of Precision Nutrition and Personalized Food Manufacturing, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The effects of ergosterol-rich *Lentinus edodes* stalk extracts on lipid metabolism remain unknown; thus, the content of ergosterol in the cap and stalk of *L. edodes* was analyzed using high performance liquid chromatography and the regulatory effects

引文格式:

隋嘉伟,崔丹丹,王惺雅,等.富含麦角甾醇的香菇柄提取物调节大鼠脂质代谢[J].现代食品科技,2026,42(2):40-49.

SUI Jiawei, CUI Dandan, WANG Xingya, et al. Regulation of lipid metabolism in rats using ergosterol-rich *Lentinus edodes* stalk extracts [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 40-49.

收稿日期: 2024-12-09; 修回日期: 2025-02-06; 接受日期: 2025-02-14

基金项目: 广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室开放基金资助项目 (FMR2023011Z); 食品营养与安全湖北省重点实验室开放基金 (FNS-HBKL2023A01); 云南省精准营养与个性化食品制造重点实验室开放课题 (YNJZKF2024A04); “云南省省市一体化专项 (202302AN360002); 江苏大学 2024 年大学生创新训练计划项目 (202410299231Y)

作者简介: 隋嘉伟 (2003-), 男, 本科生, 研究方向: 食品营养, E-mail: 2634507297@qq.com; 共同第一作者: 崔丹丹 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养, E-mail: 1499471869@qq.com

通讯作者: 何文森 (1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 油脂加工与脂质营养, E-mail: wshe2013@163.com

of the n-hexane extract (SEHE) and methanol/dichloromethane extract (SEMD) of the stalk on serum lipids, liver lipids and fecal lipids investigated in a rat model induced by a high-cholesterol diet. The ergosterol content of $7.82 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ in the *L. edodes* cap was found to be significantly higher than the $5.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ in the stalk, and the ergosterol content of SEHE was 20.31% (*m/m*) was higher than the 6.12% (*m/m*) obtained for SEMD. Animal experiments showed that both SEHE and SEMD could significantly reduce the level of low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), with reductions of 51.02% ($P<0.05$) and 58.34% ($P<0.05$), respectively, and effectively reduce the LDL-C/high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) ratio, with reductions of 54.61% ($P<0.05$) and 53.04% ($P<0.05$), respectively, in the rat serum. The two extracts were also found to reduce the cholesterol content (-19.31% , $P<0.05$; -23.73% , $P<0.05$) and triglyceride content (-9.82% , $P=0.11$; -24.83% , $P<0.05$) in rat liver. SEMD was also found to significantly reduce the total cholesterol (TC) level in rat serum (-13.31% , $P<0.05$). These findings indicate that both stalk extracts effectively regulated lipid metabolism in rats and have the potential to be used as functional food ingredients for the prevention of cardiovascular disease.

Key words: *Lentinus edodes* stalk extract; lipid metabolism; blood lipid; ergosterol; edible fungus

香菇, 这一营养丰富且风味独特的食用菌, 不仅深受消费者青睐, 还荣膺世界第二大食用菌的殊荣。其内含诸如香菇多糖、膳食纤维及甾醇等多种活性成分, 这些成分共同赋予了香菇广泛的生物活性。其中, 香菇多糖是当前研究的热点, 已被证实具有调节免疫^[1]、抗肿瘤^[2,3]、抗氧化^[4,5]、抑菌^[6]等多重功效, 展现出巨大的应用潜力。

甾醇, 作为一类广泛存在于真核生物体内的甾体化合物, 种类繁多, 根据来源差异可分为胆固醇(动物来源)、植物甾醇(植物来源)和麦角甾醇(真菌来源)^[7]。植物甾醇, 多见于植物油、豆类、谷物、坚果及种子中, 具有显著的降胆固醇效果, 对预防心血管疾病具有重要意义。而麦角甾醇, 作为真菌的标志性成分, 其含量通常超过真菌总甾醇的 80%^[8-10]。目前关于香菇中麦角甾醇的含量及生物活性的研究却相对较少。研究发现, 给大鼠饲喂含 0.5%~1.5% 麦角甾醇的高胆固醇饲料可以使得血清总胆固醇(Total Cholesterol, TC)和低密度脂蛋白胆固醇(Low-Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C)含量分别降低 19.4%~21.6% 和 42.0%~42.6%^[11]。此外, 富含麦角甾醇的平菇^[12]、榆黄蘑^[13]、双胞胎^[14]、金针菇^[15]及虎奶菇^[16]等真菌提取物, 在动物实验中已表现出显著地降脂作用。然而, 香菇中麦角甾醇的含量及其降脂效果仍不明确。同时, 菌柄作为香菇的重要组成部分, 约占其总重的 30%, 却因质地和口感问题常被视作加工副产物或废弃物。

鉴于此, 该文探究了多种提取参数(如提取方法、溶剂种类与配比、物料比及提取时长)对香菇中麦角甾醇提取效率的影响, 并对比分析了菌盖和菌柄中麦角甾醇的含量差异。在此基础上, 选用利用率偏低的菌柄作为原料, 采用正己烷及甲醇/二氯甲烷混

合溶剂制备出两种富含麦角甾醇的菌柄提取物 SEHE 和 SEMD, 研究它们对大鼠脂质代谢的调节作用。该研究不仅揭示了香菇不同部位中麦角甾醇的分布特征, 还阐明了富含麦角甾醇的不同菌柄提取物在调节脂质代谢方面的潜力。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香菇及香菇柄, 由三里岗香菇实业有限公司提供; 纯度>95%的麦角甾醇, 购自西安百川生物科技有限公司; 色谱级甲醇, 购自国药集团化学试剂有限公司; 胆盐与胆固醇, 由安徽天启化工有限公司提供; 血清 TC、LDL-C、甘油三酯(Triglyceride, TG)、高密度脂蛋白胆固醇(High-Density Lipoprotein Cholesterol, HDL-C)、胆汁酸(Total Bile Acid, TBA)等试剂盒, 均购自南京建成生物工程研究所。其它试剂均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司。

LC-20AB 高效液相色谱, 岛津公司; ZAM4000 蒸发光散射检测器(Evaporative Light Scattering Detector, ELSD), 德国珊贝克公司; AU700 全自动生化分析仪, 日本 Olympus 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香菇菌盖和菌柄提取物样品制备

干制香菇菌盖或菌柄粉碎后过 40 目筛, 称取 0.38~1.39 g 粉末按一定料液比(1:15~1:55, *V/V*)加入不同萃取溶剂, 在磁力搅拌油浴装置或超声清洗仪中萃取 1~3 h。收集上清, 旋转蒸发得菌盖或菌柄提取物, 并按公式(1)计算菌盖或菌柄提取物得率:

$$B = \frac{W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

B ——菌盖或菌柄提取物得率 (EY), %;

W_0 ——制备该提取物所需菌盖或菌柄粉末质量, mg;

W_1 ——实际得到的菌盖或菌柄提取物质量, mg。

称取 0.10 g 菌盖或菌柄提取物, 加入 3 mL 2 mol·L⁻¹ 氢氧化钾乙醇溶液中, 通过旋涡振荡确保完全溶解。之后, 将此溶液置于 70 °C 水浴中加热 1 h, 待其冷却至室温后, 使用浓盐酸进行中和处理。接着, 加入 5 mL 二氯甲烷, 再次进行旋涡振荡以实现充分萃取。经离心 (3 000 r·min⁻¹, 10 min, 25 °C) 后, 分离出二氯甲烷层, 并使用 0.45 μm 有机滤膜过滤。最终, 将得到滤液转移至液相色谱样品瓶中, 以备检测。

1.2.2 香菇菌柄提取物成分分析

香菇菌柄经粉碎处理并通过 40 目筛网, 获得菌柄粉末。随后, 于圆底烧瓶中精确称量一定质量的菌柄粉末, 按 1:35 (g·mL⁻¹, m/V) 的料液比加入正己烷或甲醇/二氯甲烷混合溶剂 (4:1, V/V), 在 30 °C 条件下进行超声波提取 2 h, 从而制得 SEHE 和 SEMD。接着, 对这两种提取物进行成分分析, 其中蛋白质含量的测定遵循 GB 5009.5-2016 标准, 脂肪含量依据 GB 5009.6-2016 标准, 粗多糖含量参考 NY/T 1676-2008 标准, 总糖含量根据 GB/T 15672-2009 标准, 粗纤维含量则按照 GB/T 5009.10-2003 标准进行测定, 多酚含量的测定则执行 GB 1886.211-2016 标准。

1.2.3 提取物中麦角甾醇的测定

参考 Heleno 等^[17] 的方法, 采用高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 法测定菌盖及菌柄提取物中的麦角甾醇含量。测定条件如下: 使用 Symmetry C18 色谱柱 (5 μm×4.6 mm×150 mm, Waters 公司); ELSD 载气为氮气, 温度为 60 °C, 压力为 0.3 MPa; 流动相为甲醇, 流量为 1 mL·min⁻¹; 柱温 35 °C。用标准曲线法进行定量分析, 标准曲线方程为: $Y=1.1 \times 10^7 X-916361$ ($R^2>0.99$)。最后, 根据公式 (2) 和公式 (3) 分别计算提取物及菌盖或菌柄中麦角甾醇的含量。

$$D_1 = \frac{W_{LP}}{W_1} \times 1000\% \quad (2)$$

$$D_2 = \frac{W_{LP}}{W_0} \times 1000\% \quad (3)$$

式中:

D_1 ——菌盖或菌柄提取物中麦角甾醇含量 (ES), %;

D_2 ——菌盖或菌柄中麦角甾醇含量 (LS), %;

W_0 ——制备该提取物所需菌盖或菌柄粉末质量, mg;

W_1 ——实际得到的菌盖或菌柄提取物质量, mg;

W_{LP} ——经液相方法计算得到的麦角甾醇质量, mg。

将方法 1.2.1 制备的香菇菌盖提取物, 制成六份等浓度溶液。向其中三份中加入 1 mg 麦角甾醇标准品, 充分混合均匀, 即得三份加标提取物溶液。利用高效液相色谱测定加标与未加标提取物中麦角甾醇的浓度。根据公式 (4) 计算香菇菌盖中麦角甾醇的回收率。

$$R = \frac{W_{as}-W_{ns}}{W_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

R ——回收率, %;

W_{as} ——加标提取物中麦角甾醇的质量, mg;

W_{ns} ——未加标提取物中麦角甾醇的质量, mg;

W_s ——麦角甾醇标准品的质量, mg。

1.2.4 动物分组与喂养

32 只健康雄性 Sprague-Dawley (SD) 大鼠 (体重 240~260 g), 购自江苏大学实验动物中心 (动物许可证号 SCXK (苏) 2023-0017), 按体重均分为四组: 空白组、高胆固醇组、正己烷提取物组 (SEHE 组)、甲醇/二氯甲烷提取物组 (SEMD 组), 每组 8 只, 体重无显著差异。大鼠在无特定病原体 (SPF) 环境下饲养, 温度 22~25 °C, 湿度 50%~70%, 12 h 明暗循环, 提供洁净饮水, 定期更换垫料。大鼠先适应基础饲料一周, 之后空白组继续喂基础饲料, 其余组喂高胆固醇饲料, 具体配方参考《保健食品检验与评价技术规范》2003 版并略作修改。参考 Hu 等^[13] (2006) 方法并稍作修改确定提取物的灌胃剂量, 以大豆油为媒介溶解提取物, 实验组按剂量 0.2 g·kg⁻¹ 体重灌胃 1 mL 提取物, 空白组和高胆固醇组灌胃等体积大豆油。整个实验持续 8 周, 期间定期监测大鼠生长状态。喂养结束后, 收集 SD 大鼠粪便。大鼠禁食 12 h (水自由), 麻醉解剖后, 从腹主动脉采血, 收集并保存脏器, 记录体质量, 计算脏器指数。整个实验操作严格按照江苏大学实验动物管理和使用委员会规定执行, 伦理编号为: UJS-IACUC-1719562。

1.2.5 血清生化指标测定

将血液置于真空负压采血管中, 室温静置 4 h 后, 以 3 000 r·min⁻¹ 的速度离心 10 min。分离出的上层血清被收集到离心管中, 并置于 4 °C 冷藏以备后续使用。利用全自动生化分析仪, 测定血清各项血脂、肾功能以及肝功能指标。

1.2.6 肝脏脂质含量测定

肝脏脂质测定参照 He 等^[18] 方法, 稍作修改。适量肝脏于 9 倍体积无水乙醇中充分匀浆, 于 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 取上清液置于离心管中。随后, 依据相应

试剂盒的说明分别测定肝脏中的胆固醇和甘油三酯含量。

1.2.7 粪便脂质测定

将粪便样本置于 60 °C 条件下进行真空干燥处理, 随后通过 40 目筛网进行研磨以获得细腻粉末。取此粉末 0.5 g, 采用三氯甲烷与无水乙醇以体积比 2:1 的比例进行 10 倍稀释, 并借助漩涡振荡器实现充分混合。随后, 将混合物于 60 °C 水浴中萃取 2 h, 之后以 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 分离所得上清液被收集至离心管中, 以备后续分析使用。

甘油三酯、TBA: 取上述上清液 0.2 mL, 经氮吹后重溶解异丙醇, 具体步骤按试剂盒说明书执行。

胆固醇、麦角甾醇: 取上清液 0.2 mL, 氮气吹干后加入 0.5 mL 0.5 mol·L⁻¹ 的 KOH 乙醇溶液, 振荡均匀后, 在 70 °C 水浴中皂化处理 2 h。待样本完全干燥后, 依次加入 0.8 mL 蒸馏水、50 μL 浓盐酸及 1 mL 三氯甲烷, 漩涡混匀, 在 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min。取下层溶液 1.6 mL, 氮气吹干后用 1 mL 无水乙醇溶解, 随后进行 HPLC-ELSD 分析, 色谱条件同 1.2.3 节。胆固醇和麦角甾醇含量由标准曲线计算所得。

1.2.8 数据统计学处理

实验所得数据均采用平均值 ± 标准差的形式呈现。用 SPSS 22 软件进行单因素方差分析评估各组间的显著性差异。显著差异用不同字母 (a, b, c, d) 标注, 表示 *P* 值小于 0.05。

2 结果与讨论

2.1 香菇中麦角甾醇的液相色谱分析

麦角甾醇标准品的高效液相色谱图如图 1a 所示, 其保留时间为 10.69 min。图 1b 则显示了香菇菌盖提取物中的高效液相色谱图, 明确显示了与麦角甾醇相对应的色谱峰, 证实了香菇菌盖提取物含有麦角甾醇。在相同色谱条件下, 对同一浓度的麦角甾醇溶液重复检测 6 次, 结果显示峰面积值的相对标准偏差仅为 8.63% (低于 10%), 证明了该方法的高精密度。另外, 回收率实验得出香菇菌盖中麦角甾醇的回收率高达 112.71%, 且相对标准偏差为 6.52%。综上所述, 该方法在重复性、精密度及回收率方面均表现优异, 能有效准确测定香菇中的麦角甾醇含量。

2.2 菌盖和菌柄中麦角甾醇的含量分析

提取物得率高低反映菌盖和菌柄粉末经溶剂浸提后可得到固形物含量多少, 提取物中甾醇含量反映了所得固形物中麦角甾醇的占比, 而香菇菌盖和菌柄中甾醇含量高低同时取决于提取物得率和提取物中甾醇

含量。分别考察了不同萃取方式、溶剂种类、溶剂比例、料液比及提取时间下不同香菇部位中麦角甾醇的含量, 结果如图 2 所示。

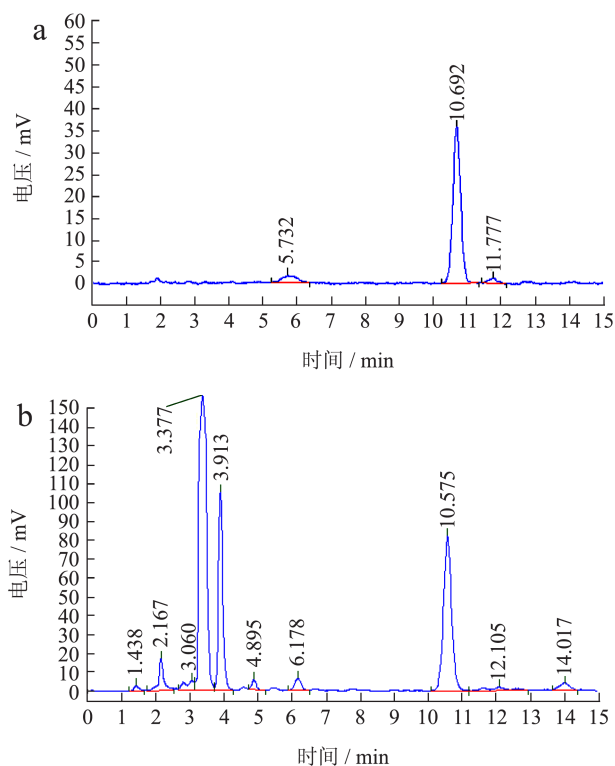
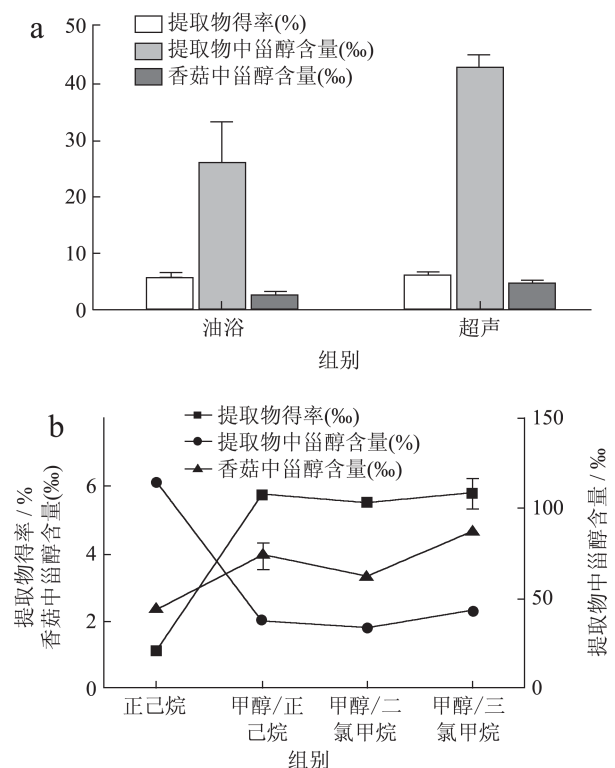


图1 麦角甾醇标品 (a) 及香菇菌盖提取物 (b) 的高效液相色谱图

Fig.1 High performance liquid chromatogram of ergosterol (a) and the extract of *Lentinula edodes* (b)



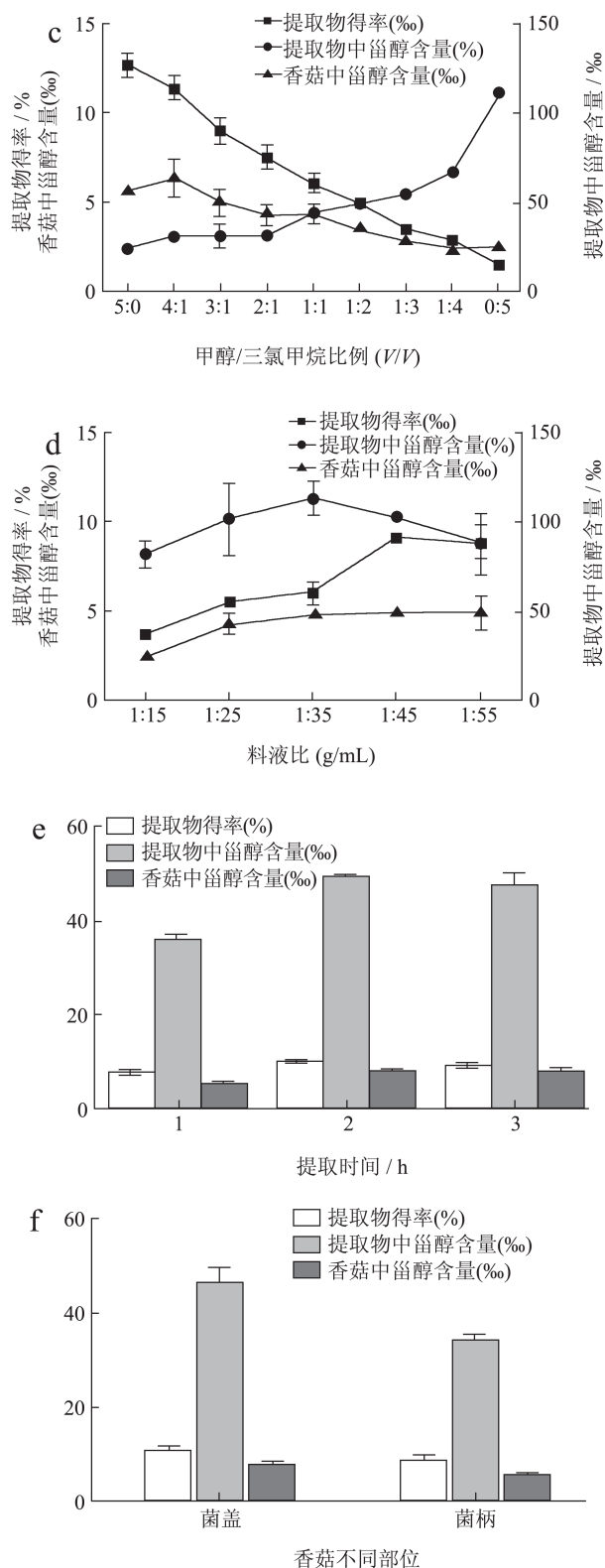


图2 不同提取条件对麦角甾醇含量的影响

Fig.2 Effect of different extraction conditions on ergosterol content

注: (a) 萃取方式; (b) 溶剂种类; (c) 溶剂比例; (d) 料液比; (e) 萃取时间; (f) 香菇部位。

图2a展示了菌盖经油浴加热与超声辅助萃取的效果对比, 结果显示超声萃取所得提取物得率为

6.12% (m/m), 高于油浴加热的 5.51% (m/m)。同时, 超声萃取所得麦角甾醇含量为 4.27% (m/m), 也显著高于油浴加热的 2.60% (m/m), 对应香菇菌盖中麦角甾醇含量分别为 0.46% (m/m) 和 0.25% (m/m)。超声萃取的这一优势得益于其空化作用, 有效促进了麦角甾醇的提取。图2b则揭示了不同溶剂组合对菌盖提取物得率和麦角甾醇含量的影响。正己烷虽能提取出高纯度的麦角甾醇, 但得率较低; 而甲醇/三氯甲烷组合则表现出最高的总得率。考虑到麦角甾醇的溶解特性, 甲醇/三氯甲烷在三项指标上均表现优异, 因此被选为最佳溶剂。

图2c进一步表明, 随着三氯甲烷比例增加, 尽管菌盖提取物中麦角甾醇的含量有所上升, 但菌盖提取物的得率及菌盖中的麦角甾醇含量却均呈下降趋势。当甲醇与三氯甲烷的体积比达到 4:1 时, 各项指标达到均衡, 因此被确定为最优比例。料液比的选择同样至关重要。图2d显示, 随着料液比的增加, 菌盖提取物得率逐渐上升并在 1:45 后趋于稳定; 而菌盖提取物中麦角甾醇含量在 1:35 时达到最大值。因此, 综合考虑菌盖提取物得率和麦角甾醇含量, 1:35 ($g \cdot mL^{-1}$) 被确定为最优料液比。此外, 萃取时间也对提取效率产生显著影响。如图2e所示, 萃取 2 h 时, 各项指标均显著增加; 但当萃取时间延长至 3 h 时, 各项指标则略有下降。

综上所述, 最优的萃取工艺为: 采用甲醇/三氯甲烷 (4:1, V/V) 作为溶剂, 料液比为 1:35 ($g \cdot mL^{-1}$), 在 30 $^{\circ}C$ 下进行 2 h 的超声萃取。此时, 香菇菌盖中麦角甾醇含量达 $7.82 mg \cdot g^{-1}$, 高于菌柄中的 $5.24 mg \cdot g^{-1}$ 。与文献报道相比^[19,20], 该文所得结果较高, 这可能与香菇品种、贮藏条件、提取条件、测定方法等因素有关。例如, 研究表明香菇在较高温度下储存时, 麦角甾醇含量会降低^[21]。

2.3 香菇菌柄及其提取物的成分分析

由上可知, 甲醇/三氯甲烷 (4:1, V/V) 作为萃取溶剂时, 香菇菌盖中甾醇含量达到最高。然而, 考虑到氯仿的毒性及管制性, 以及二氯甲烷的低沸点与非管制性, 在大量制备香菇菌柄提取物时选择了甲醇/二氯甲烷 (4:1, V/V) 作为替代溶剂。此外, 正己烷提取物中甾醇含量最高, 也被选为后续动物实验所需提取物的萃取溶剂之一。因此, 该文以正己烷和甲醇/二氯甲烷 (4:1, V/V) 为溶剂制备了两种菌柄提取物 SEHE 和 SEMD。表1列出了香菇菌柄及这两种提取物的主要成分。对比发现, 香菇菌柄中的蛋白质、粗多糖及粗纤维含量均高于两种提取物, 而脂肪含量则相对较低。在两种菌柄提取物中, SEMD 中的蛋白质、总糖和多酚含量更高, 但粗纤维及麦角甾醇含量则较

低。这与溶剂的理化性质有关，因为不同溶剂对不同成分的选择性不同。

表 1 香菇柄及其提取物的主要成分

Table 1 Main components of mushroom stipe and its extract			
成分 (g/100 g)	香菇柄	SEHE	SEMD
蛋白质	21.73 ± 0.21 ^a	2.40 ± 0.33 ^c	10.32 ± 0.21 ^b
脂肪	5.63 ± 0.02 ^c	49.01 ± 1.62 ^a	25.13 ± 0.32 ^b
总糖	29.42 ± 0.83 ^b	10.42 ± 0.12 ^c	42.54 ± 0.03 ^b
粗多糖	6.92 ± 0.34 ^a	3.53 ± 0.13 ^c	4.43 ± 0.03 ^b
粗纤维	23.51 ± 0.12 ^a	2.44 ± 0.14 ^b	2.12 ± 0.12 ^c
多酚	/	0.23 ± 0.01 ^b	0.42 ± 0.13 ^a
麦角甾醇	/	20.33 ± 6.02 ^a	6.11 ± 0.94 ^b

注：不同小写字母（a、b 和 c）表示同一行数据之间有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

2.4 大鼠体质量及摄食量

如表 2 所示，各组大鼠的摄食量、初始体质量、最终体质量以及体质量增量均未呈现出统计学上的显著差异。这一结果表明，SEHE 和 SEMD 均未对大鼠的摄食习惯及体质量产生明显影响。文献报道，特定剂量的香菇多糖或红菇、灵芝能够有效减缓高脂饮食大鼠的体质量增长，但在相同剂量下竹荪并未展现出类似的体质量抑制效果^[22,23]。此外，小鼠摄入蛹虫草子实体超细粉后，其体质量亦无显著变化^[24]。前期研究也发现，膳食中补充 0.5%~1.5% 的麦角甾醇并未导致大鼠体质量发生显著变化^[8]。

2.5 大鼠脏器指数

表 3 列出了各组大鼠的脏器指数。其中，肝脏作为脂质代谢的主要器官，其相对大小在一定程度

上反映出脂质代谢情况。与空白组相比，高胆固醇组的肝指数显著增加 45.48%。表明长期高脂高胆固醇饮食可导致肝脏发生增生性肥大，并可能引发炎症反应和脂肪肝等病理改变。此外，高胆固醇组的心指数、肾指数和脾指数与空白组相比均未呈现显著差异（ $P>0.05$ ），说明高脂高胆固醇饮食对这些脏器的影响有限。然而，与高胆固醇组相比，SEHE 组和 SEMD 组分别表现出不同的脏器指数变化：SEHE 组心指数降低 10.34%，而 SEMD 组肾指数增加 10.34%。这两种提取物对心指数和肾指数产生的差异性影响，其具体原因尚不清楚。考虑到脏器指数是脏器质量与体质量的比值，体质量的变化可能是导致脏器指数改变的一个潜在因素。

2.6 血脂水平

各组大鼠的血清脂质水平如图 3 所示。相较于空白组，高胆固醇组大鼠血清 TC、LDL-C、LDL-C/HDL-C 显著升高，分别增长了 19.51%、255.60% 和 371.42%，而 HDL-C 水平则显著降低 21.91%，表明高脂模型成功建立。与高胆固醇组相比，SEHE 组大鼠血清 TC 无显著差异，而 SEMD 组则显著降低 13.31%（图 3a）。在 TG 方面，SEHE 组无显著变化，SEMD 组则呈现非显著性下降（图 3b）。对于 LDL-C，SEHE 组和 SEMD 组分别显著降低 51.02% 和 58.34%（图 3c）。两种提取物对 HDL-C 水平均无显著影响，但 SEHE 组有轻微上升趋势（图 3d）。值得注意的是，相较于高胆固醇组，SEHE 组和 SEMD 组的血清 LDL-C/HDL-C 分别显著降低 54.61% 和 53.04%（图 3e）。

表 2 各组大鼠的初始体质量、最终体质量、体质量增量与日摄食量

Table 2 Initial body weight, final body weight, body weight gain, and daily food intake of rats in each group					
质量	空白组	高胆固醇组	SEHE 组	SEMD 组	P 值
初始体质量/g	261.14 ± 10.62	261.53 ± 15.71	261.60 ± 12.31	262.12 ± 13.34	1.00
最终体质量/g	514.32 ± 51.34	520.52 ± 38.02	534.11 ± 40.22	531.53 ± 33.74	0.54
体质量增量/g	243.40 ± 46.73	244.41 ± 39.63	277.81 ± 50.83	266.53 ± 35.82	0.55
摄食量/[g·(d·只) ⁻¹]	25.42 ± 3.52	23.90 ± 2.74	24.03 ± 3.64	24.40 ± 2.52	0.76

表 3 各组大鼠脏器指数（%）

Table 3 Organ index of rats in each group (%)					
指标	空白组	高胆固醇组	SEHE 组	SEMD 组	P 值
心指数	0.30 ± 0.03 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.26 ± 0.03 ^b	0.30 ± 0.01 ^a	0.02
肝指数	3.10 ± 0.29 ^b	4.51 ± 0.32 ^a	4.23 ± 0.43 ^a	4.57 ± 0.29 ^a	<0.01
脾指数	0.19 ± 0.03	0.19 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.19 ± 0.02	0.26
肾指数	0.65 ± 0.04 ^a	0.58 ± 0.03 ^b	0.57 ± 0.04 ^b	0.64 ± 0.04 ^a	<0.01

注：不同小写字母（a、b）表示同一行数据之间有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

Yeh 等^[15]研究表明, 金针菇粉或其提取物能够降低仓鼠的血清 LDL-C 水平。此外, 已证实榆黄蘑提取物和微藻提取物能显著降低高脂饮食仓鼠的血清 TC 水平^[13,25]。另有研究显示, 源自白灵菇和平菇富含麦角甾醇的提取物可导致糖尿病小鼠和高胆固醇饮食大鼠血清 TG 水平的显著降低^[12]。杜妍等^[26]发现, 猴头菌、灵芝、虫草头孢的正己烷提取物可以显著抑制 TG 合成。然而, 该研究发现两个实验组大鼠的血清 TG 和 HDL-C 水平并未发生显著变化。这主要与提取物的剂量、给予方式、实验周期长短以及成分差异有密切关系。尽管如此, SEHE 组虽然血清 TC 水平未发生显著变化, 但较高胆固醇组 LDL-C 水平有所降低, HDL-C 水平则有所升高, 导致 LDL-C/HDL-C 下降。这一结果表明, 两种菌柄提取物均能在一定程度上降低动脉粥样硬化的风险。

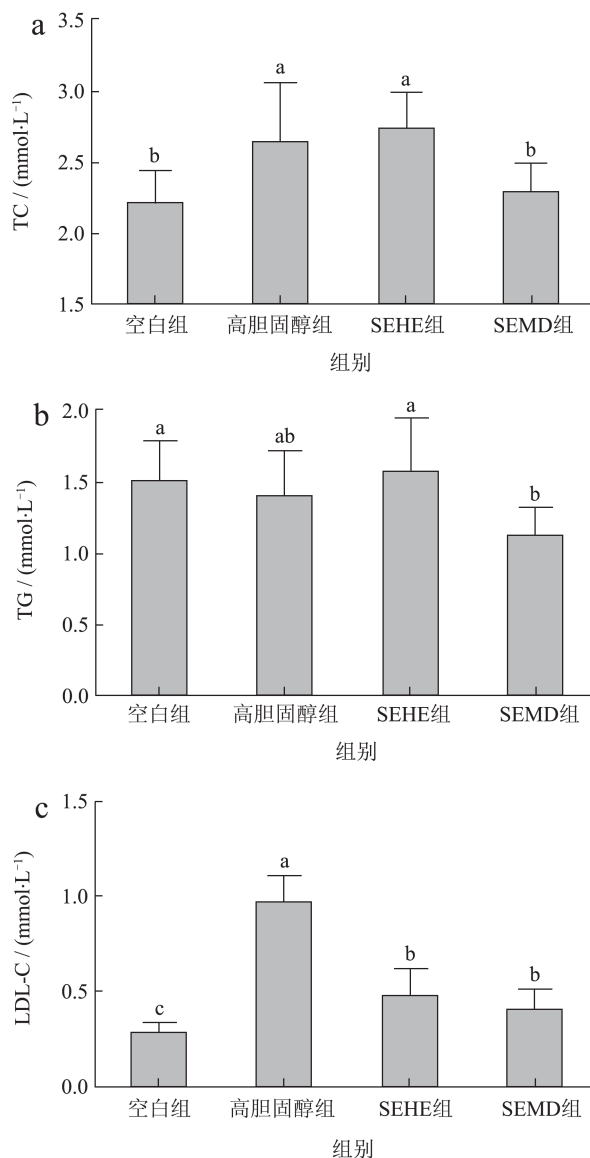


图 3 各组大鼠的血清指标水平

Fig.3 Serum index levels of rats in each group

注: (a) TC; (b) TG; (c) LDL-C; (d) HDL-C 和 (e) LDL-C/HDL-C。图中不同小写字母表示对应组之间具有显著性差异。下同。

2.7 肝脏脂质水平

机体每日所需的胆固醇约 70% 至 80% 由肝脏合成, 且当外源性胆固醇摄入增多时, 机体内源性合成的胆固醇会相应减少^[27]。图 4 展示了各组大鼠肝脏的脂质水平状况。具体而言, 与空白组相比, 高胆固醇组大鼠的肝脏胆固醇和甘油三酯水平分别显著增加了 172.91% 和 30.63%。而补充 SEHE 和 SEMD 的大鼠, 其肝脏胆固醇水平分别下降了 19.31% ($P < 0.05$) 和 23.73% ($P < 0.05$), 同时肝脏甘油三酯水平也分别降低 9.82% ($P = 0.11$) 和 24.83% ($P < 0.05$)。

这些结果表明, 高胆固醇饮食会导致大鼠肝脏中胆固醇和甘油三酯的积聚, 而 SEHE 和 SEMD 均能有效降低肝脏胆固醇水平, 并在一定程度上减少甘油三酯含量, 这对于预防非酒精性脂肪肝的发生具有积极意义。此外, GilRamírez 等^[14]发现, 麦角甾醇和双胞菇提取物 (含麦角甾醇) 均能显著降低小鼠肝脏胆固醇水平。滑子菇多糖能显著降低高脂血症 Wister 大鼠的甘油三酯水平^[28]。这些发现进一步支持了该研究的结论, 即香菇提取物在调节脂质代谢方面可能具有潜在的健康益处。

表 4 各组大鼠的肝功能和肾功能指标
Table 4 Index of liver, renal function of rats in each group

组别	空白组	高胆固醇组	SEHE 组	SEMD 组	P 值
ALT/(U·L ⁻¹)	38.71 ± 3.42 ^b	46.70 ± 5.74 ^a	48.41 ± 9.52 ^a	51.61 ± 16.42 ^a	0.08
AST/(U·L ⁻¹)	181.93 ± 24.80	219.82 ± 79.13	197.40 ± 45.23	206.03 ± 33.42	0.50
BUN/(μmol·L ⁻¹)	5.54 ± 0.91 ^a	4.81 ± 0.52 ^{ab}	5.42 ± 1.02 ^{ab}	4.72 ± 0.70 ^b	0.08
CREA/(μmol·L ⁻¹)	22.92 ± 4.24 ^b	27.42 ± 2.73 ^a	30.63 ± 6.03 ^a	28.03 ± 3.81 ^a	0.01
UA/(μmol·L ⁻¹)	88.60 ± 31.02	102.81 ± 30.03	78.63 ± 22.94	97.81 ± 28.92	0.08

注：不同小写字母（a、b）表示同一行数据之间有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

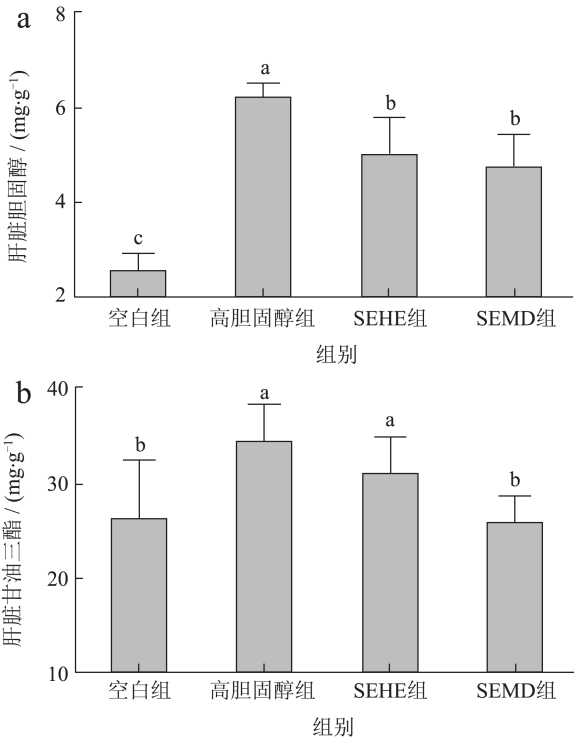


图 4 各组大鼠的肝脏胆固醇和甘油三酯水平
Fig.4 Levels of liver cholesterol and triglycerides in rats from various groups

2.8 肝功能和肾功能

当肝细胞受损或坏死时，会释放内部酶进入血清，其中谷丙转氨酶（Alanine Aminotransferase, ALT）和谷草转氨酶（Aspartate Aminotransferase, AST）的水平能有效反映肝细胞损伤的程度^[29]。同样地，血液尿素氮（Blood Urea Nitrogen, BUN）含量过高可能指示急慢性肾功能障碍，而肌酐（Creatinine, CREA）水平过高则提示肾小球滤过功能有所减退，过低则可能与进行性肌萎缩等相关；尿酸（Urine acid, UA）水平过高可能预示着肾衰竭的风险，而过低则常见于恶性贫血等疾病^[30]。

表 4 列出了各组大鼠的肝功能和肾功能指标。与空白组相比，高胆固醇组的 ALT 和 CREA 水平分别显著上升了 20.52% 和 19.71%，表明高胆固醇饮食会损害大鼠的肝、肾功能。然而，SEHE 组和 SEMD 组在肝、

肾功能指标上与高胆固醇组并未出现显著差异，表明 SEHE 和 SEMD 在所用剂量下不会对大鼠的肝、肾功能产生额外的负面影响。

2.9 粪便脂质水平

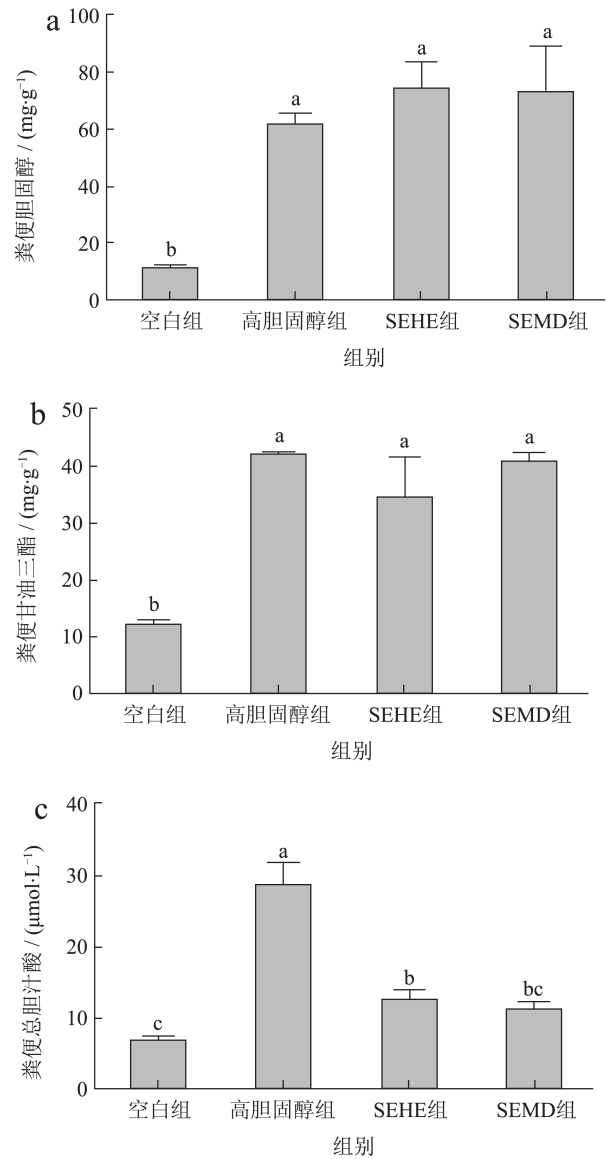


图 5 各组大鼠粪便胆固醇、甘油三酯和胆汁酸水平
Fig.5 Levels of fecal cholesterol, triglycerides, and bile acids in rats from various groups

图5为各组大鼠粪便的脂质水平情况。与空白组相比,高胆固醇组的粪便中胆固醇和甘油三酯水平分别显著升高了454.63%和249.02%。然而,尽管SEHE组和SEMD组的粪便胆固醇水平相与高胆固醇组并无显著差异,但仍呈现一定的上升趋势;同时,这两组的甘油三酯水平也未发现显著性差异。类似地,Yoon等^[31]发现膳食补充香菇对高血脂症大鼠的肝脏胆固醇和甘油三酯水平无显著影响。值得注意的是,SEHE组和SEMD组的粪便中胆汁酸水平显著降低,降幅分别达到了56.32%和61.03%。已有研究表明,膳食补充豆甾醇和 β -谷甾醇可分别降低wild-type Kyoto小鼠和Wistar大鼠体内胆汁酸的合成^[1]。鉴于胆汁酸水平的降低会阻碍胆固醇在肠道内的吸收,因此推测这两种提取物可能通过抑制胆固醇吸收,促使更多胆固醇经粪便排出体外。

3 结论

本文对比分析了香菇菌盖与菌柄中麦角甾醇的含量差异,并探究了富含麦角甾醇的菌柄提取物对大鼠脂质代谢的影响。研究结果显示,香菇菌盖中的麦角甾醇含量高于菌柄。在对比两种香菇柄提取物的麦角甾醇含量时,发现正己烷提取法所得麦角甾醇含量显著高于甲醇/二氯甲烷提取法。动物实验表明,两种提取物SEHE和SEMD均展现出了调节脂质代谢的显著效果,具体表现为能有效降低血清LDL-C水平及LDL-C/HDL-C比值,减少肝脏胆固醇和甘油三酯的积累,并促进粪便中胆固醇的排出。相比之下,SEMD在显著降低肝脏甘油三酯含量及有降低血清TG趋势方面表现更为出色,凸显了其在调节脂质代谢方面的独特优势。由此表明,除了麦角甾醇外,菌柄提取物中的其他成分,如蛋白质、多糖、多酚等,同样在调节脂质代谢中发挥着不可忽视的作用。

参考文献

- [1] HE J, LIU Z, JIANG W, et al. Immune-adjuvant activity of lentinan-modified calcium carbonate microparticles on a H5N1 vaccine [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1384-1392.
- [2] AHN H, JEON E, KIM J C, et al. Lentinan from shiitake selectively attenuates AIM2 and non-canonical inflammasome activation while inducing pro-inflammatory cytokine production [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1314.
- [3] XU H L, DAI J H, HU T, et al. Lentinan up-regulates microRNA-340 to promote apoptosis and autophagy of human osteosarcoma cells [J]. International Journal of Clinical and Experimental Pathology, 2018, 11(8): 3876-3883.
- [4] ZI Y, ZHANG B, JIANG B, et al. Antioxidant action and protective and reparative effects of lentinan on oxidative damage in Hacat cells [J]. Journal of Cosmetic Dermatology, 2018, 17(6): 1108-1114.
- [5] UTAMI W, NOVITASARI B, HANWAR D. P21 Antioxidant activity of the extract of Lingzhi mushroom (*Ganoderma lucidum*): As reductant and inhibitor of lipid peroxidation [J]. Biochemical Pharmacology, 2017, 139: 132.
- [6] 王转莉,成孜晗,赵明阳.“宁陕香菇”多糖提取及抑菌效果初探[J].西安文理学院学报(自然科学版),2020,23(1):56-59.
- [7] HE W S, ZHU H, CHEN ZY. Plant sterols: chemical and enzymatic structural modifications and effects on their cholesterol-lowering activity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 3047-3062.
- [8] 何文森,李洁,李志烁,等.麦角甾醇酯的酶促合成及对非酒精性脂肪肝的预防作用[J].现代食品科技,2024,40(9):1-13.
- [9] 曹燕妮,华蓉,游金坤,等.超高效液相色谱-三重四级杆串联质谱法(UHPLC-MS/MS)测定松茸中麦角甾醇含量[J].中国食用菌,2024,42(6):69-73.
- [10] 艾洪湖,程艳芬,云少君,等.香菇中麦角甾醇的提取纯化、表征及其抗氧化活性[J].食品研究与开发,2024,45(20):25-34.
- [11] HE WS, CUI D, LI L, et al. Cholesterol-reducing effect of ergosterol is modulated via inhibition of cholesterol absorption and promotion of cholesterol excretion [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 57: 488-496.
- [12] XIONG M, HUANG Y, LIU Y, et al. Antidiabetic activity of ergosterol from *Pleurotus ostreatus* in KK-A(y) mice with spontaneous type 2 diabetes mellitus [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2018, 62(3): 1700444.
- [13] HU S H, LIANG Z C, CHIA Y C, et al. Antihyperlipidemic and antioxidant effects of extracts from *Pleurotus citrinopileatus* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(6): 2103-2110.
- [14] GIL-RAMAMÍREZ A, CAZ V, MARTIN-HERNANDEZ R, et al. Modulation of cholesterol-related gene expression by ergosterol and ergosterol-enriched extracts obtained from *Agaricus bisporus* [J]. European Journal of Nutrition, 2016, 55(3): 1041-1057.
- [15] YEH M Y, KO W C, LIN L Y. Hypolipidemic and antioxidant activity of enoki mushrooms (*Flammulina velutipes*) [J]. Biomed Research International, 2014, 2014: 352385.
- [16] 刘媛.虎奶菇甾醇提取分离及其生物活性研究[D].杭州:浙江农林大学,2024.
- [17] HELENO S A, DIA P, PRIETO M A, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction to obtain mycosterols from *Agaricus bisporus* L. by response surface methodology and comparison with conventional soxhlet extraction [J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt B): 1054-1063.
- [18] HE W S, PAN R R, LI L L, et al. Combined lowering effect of phytosterol esters and tea extracts on lipid profiles in SD rats [J]. Food Science and Technology Research, 2018, 24(5): 875-882.
- [19] 史德芳,高虹,程薇,等.闪式提取香菇柄中麦角甾醇工艺研究[J].

食品工业科技,2014,35(9):208-210.

[20] 高虹,程薇,周明,等.高效液相法测定香菇柄麦角甾醇的含量[J].菌物研究,2013,11(2):78-81.

[21] 颜延宁,周璐,朱杰.贮藏条件对食用菌中麦角甾醇含量的影响[J].食用菌,2015,37(2):60-61.

[22] 曾琳娜.香菇多糖降脂作用的评估及分子机制的研究[D].长沙:中南林业科技大学,2016.

[23] 徐惠龙,杨志坚,郑金贵.3种食用菌对高脂血症大鼠脂质代谢的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2014,43(4):430-433.

[24] 孙勇,杨文建,马宁,等.蛹虫草子实体超细粉对小鼠免疫力及抗氧化功能的调节作用[J].食用菌学报,2013,20(1):66-69.

[25] CHEN J, JIAO R, JIANG Y, et al. Algal Sterols are as effective as β -sitosterol in reducing plasma cholesterol concentration [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(3): 675-681.

[26] 杜妍,韩一凤,陆震鸣,等.药食用真菌菌丝提取物的降糖和降脂活性[J].菌物学报,2018,37(5):656-666.

[27] 魏宁波,刘红云,汪海峰,等.固醇调控元件结合蛋白在胆固醇代谢中作用机制的研究进展[J].中国畜牧杂志,2013,49(5):80-84.

[28] LI H, ZHANG M, MA G. Hypolipidemic effect of the polysaccharide from *Pholiota nameko* [J]. Nutrition, 2010, 26(5): 556-562.

[29] 孙蓉,杨倩,黄伟,等.肝功能相关指标在中药肝毒性损伤中作用与毒性相关程度分析[J].中药药理与临床,2008,24(6):82-84.

[30] 宋宁,张显坤,孙艳玲,等.肾功能指标联合检测对老年原发性高血压患者早期肾损伤的诊断价值[J].山东医药,2012,52(5):60-61.

[31] YOON K N, ALAM N, LEE J S, et al. Antihyperlipidemic effect of dietary *Lentinus edodes* on plasma, feces and hepatic tissues in hypercholesterolemic rats [J]. Mycobiology, 2011, 39(2): 96-102.