DOI:10.12441/spyswjs.20240617005 [文章编号] 1673-1689(2025)11-0143-07

植物甾醇油脂体乳液对秀丽隐杆线虫脂代谢的影响及机制研究

孙 婕 袁梦圆 刘亦菲 张芙瑶 杨卓凡 尹国友*

(河南城建学院生命科学与工程学院,河南 平顶山 467036)

摘要:【目的】研究植物甾醇油脂体乳液(phytosterol-oil bodies emulsion,POE)的降脂作用。**【方法】**以秀丽隐杆线虫为模型,测定POE处理后线虫的脂代谢和生理相关指标,并分析线虫氧化应激和脂肪代谢相关基因水平变化。**【结果】**与对照组相比,不同质量浓度POE给药组可显著降低线虫肠道脂肪质量分数(P<0.01),显著降低甘油三酯的相对含量(P<0.05),对线虫生长发育无毒害作用;同时,还能显著降低活性氧水平,提高抗氧化酶水平;影响与脂肪代谢相关基因表达水平,qPCR检测结果显示,*sbp-1* 基因mRNA水平上调,*fat-2*、*nhr-80*、*fat-5* mRNA水平下调(P<0.05)。**【结论】**POE可能通过减缓脂肪沉积、调节脂肪过氧化途径和减轻线虫体内氧化应激水平来改善脂质代谢。

关键词:秀丽隐杆线虫;植物甾醇油脂体乳液;脂代谢;氧化应激

Effects and Mechanisms of Phytosterol-oil Bodies Emulsion on Lipid Metabolism of *Caenorhabditis elegans*

*SUN Jie YUAN Mengyuan LIU Yifei ZHANG Fuyao YANG Zhuofan YIN Guoyou**

(School of Life Sciences and Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the lipid-lowering effects of the phytosterol-oil bodies emulsion (POE). [**Method**] *Caenorhabditis elegans* was taken as a model to evaluate the effects of POE on lipid metabolism, physiological indexes, and expression of genes associated with oxidative stress and fat metabolism. [**Result**] Compared with the control group, different mass concentrations of POE reduced the mass fraction of fat (P<0.01) and the relative content of triglycerides (P<0.05), without toxicity to the growth and development of *C. elegans* (P<0.01). At the same time, it significantly reduced the level of reactive oxygen species and increased the levels of antioxidant enzymes. In addition, POE affected the expression levels of genes related to fat metabolism. qPCR results showed that POE up-regulated the mRNA level of *sbp-1*, while down-regulating the mRNA levels of *fat-2*, *nhr-80*, and *fat-5* (P<0.05). [**Conclusion**] POE may improve lipid metabolism by slowing fat deposition, regulating the fat peroxidation pathway, and alleviating oxidative stress in *C. elegans*.

Keywords: *Caenorhabditis elegans*; phytosterol-oil bodies emulsion; lipid metabolism; oxidative stress

肥胖是由遗传易感性、高能量食物供应增加和现代社会对体育活动需求减少等因素共同导致的一种机体代谢紊乱现象。现代医学研究[1]表明,许多慢性疾病如心血管疾病、高血压和2型糖尿病均与肥胖有关。目前,用于治疗肥胖的药物主要包括奥利司他、洛卡斯林和纳曲酮等[2]。然

基金项目:平顶山市科技创新杰出人才计划项目(2017010〔10.4〕);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102110087);河南省大学生创新创业训练计划项目(202411765016)。

通信作者:尹国友(1976—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事生物化学与分子生物学研究。E-mail:30110605@huuc.edu.cn

收稿日期:2024-06-17 **修回日期:**2025-09-21

而，长期食用化学合成减肥药有潜在的副作用和不良反应，包括低血糖、腹泻、呕吐和脂肪酶水平升高等[3]。黄酮类、多酚类和植物甾醇类等生物活性成分具有降脂作用[4-6]，可通过抑制胆固醇合成和脂质积累、减少氧化应激，并促进脂解来产生效应，从而降低肥胖带来的风险[7-9]。因此，能够调节脂质代谢且天然、低毒和靶向明确的具有生物活性的植物基营养物成为当前研究的热点。

油脂体是一种亚细胞微滴，直径为0.5~2.0 μm，其以甘油三酯为内部核心，表面由磷脂-蛋白质构成的单层膜所覆盖[10]。由于油脂体的独特结构，其可作为乳液递送体系载体基质来运载生物活性成分[11]。植物甾醇是一种类固醇，属于三萜烯化合物，具有环戊烷多氢菲的环系结构[12]。许多药理学[13-14]研究表明，植物甾醇能干扰甘油三酯及脂肪的吸收，从而影响甘油三酯及脂肪代谢。但植物甾醇的亲脂晶体结构会导致其不溶于水，与其他亲脂性生物活性物质（姜黄素、β-胡萝卜素、槲皮素）一样，其生物利用度差，肠道吸收率低[15]，一般不易被人体吸收，也难以均匀地添加到食品、化妆品和药品等水溶性产品中。因此，可以利用油脂体乳液作为植物甾醇的生物递送载体，从而提高植物甾醇的降脂效果。虽然植物甾醇具有降脂效果，但关于其降脂作用的分子机制尚未见报道。

秀丽隐杆线虫（*Caenorhabditis elegans*，*C. elegans*）是第一个基因组被完全测序的多细胞生物，与人类基因具有高度同源性[16]。其身体结构简单、周身透明且排列高度定型[17]。同时，秀丽隐杆线虫中有许多核心代谢途径相当保守，包括脂肪合成、延伸途径以及5-羟色胺和胰岛素信号途径[18]。此外，脂类物质主要沉积于线虫的消化道，其中，脂滴易被亲脂性染料油红O和尼罗红等着色，可通过固定于线虫体内染料积累程度判断脂肪积累程度[19]。线虫调节脂肪代谢的遗传信息明确，越来越多具有降脂效果的天然活性物质，如苦瓜皂苷[18]、麝香草酚[20]和灰树花提取物[21]等被广泛用于探究脂肪代谢机制[22]。

研究拟以秀丽隐杆线虫为模式生物，初步探讨植物甾醇油脂体乳液（POE）对脂肪积累的影响。采用油红O染色测定脂肪质量分数以及甘油三酯相对含量来确定植物甾醇油脂体乳液的降脂水平；测定线虫生理指标确定其有利作用，并采用抗氧化酶试剂盒检测线虫体内应激水平；通过荧光实时定量检测脂肪代谢相关基因的表达水平，从分子水平研究植物甾醇油脂体乳液的降脂活性潜力，旨在为油脂体乳液运载植物甾醇的降脂作用研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆：市售；植物甾醇（纯度≥95%）：西安海斯夫生物科技有限公司；秀丽隐杆线虫（*Caenorhabditis elegans*，野生型N2）、大肠杆菌菌株（*E. coli* OP50）：南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室余强教授惠赠；油红O染料、甘油三酯（TG）试剂盒、活性氧（ROS）试剂盒、总超氧化物歧化酶试剂盒（SOD）、丙二醛（MDA）试剂盒等：南京建成生物工程研究所；qPCR引物：上海生工生物工程有限公司。

1.2 仪器与设备

生化培养箱：SPX-150B-Z型，上海博迅实业有限公司医疗设备厂；双目体式显微镜：JSZ6型，南京江南永新光学有限公司；荧光倒置显微镜：IX-73P1F型，日本OLYMPUS公司；荧光定量PCR仪：7500型，美国ABI公司。

1.3 样品制备

1.3.1 油脂体提取

根据Zhu等[23]的方法并稍加改动。将大豆用蒸馏水浸泡12 h，磨浆，匀浆，过滤，滤液与蔗糖按质量比4∶1混匀，4 ℃、8 500 r/min离心25 min，过滤，得到大豆油体。75 ℃灭菌30 min，于4 ℃贮藏备用。

1.3.2 植物甾醇油脂体乳液制备

将0.06 g植物甾醇溶于100 mL大豆油中，50 ℃超声30 min，使植物甾醇完全溶解制得乳液油相。将大豆油体分散至蒸馏水中得到5 g/dL的水相。油相与水相混匀，12 000 r/min剪切处理20 min，均质2.5 min，即可获得植物甾醇油脂体乳液，调节乳液pH至7.0，于4 ℃贮藏备用。

1.4 油红O（ORO）染色

将同步化至L4期的线虫给药处理4 d后，用M9缓冲液冲洗，用1 g/dL叠氮化钠麻醉线虫，用4 g/dL多聚甲醛固定，−80 ℃冷冻15 min，40 ℃水

浴1 min。去除多聚甲醛后，于体积分数60%异丙醇中浸泡15 min，避光染色12 h。次日染色完成后，显微镜观察线虫体内脂肪质量分数[24]。

1.5　甘油三酯（TG）含量测定

将同步化至L4期的线虫给药处理4 d后，用M9缓冲液清洗3次，自然沉降，弃上清。加入M9缓冲液重悬虫体，5 000 r/min离心10 min，取上清液测定甘油三酯相对含量。

1.6　线虫生理指标测定

根据Lin等[18]的方法。

1）线虫大小：收集并麻醉同步化至成虫期线虫，在显微镜下直接测量每个线虫的中线和身体的最宽部分，使用显微镜成像ImageJ软件分析身体区域。

2）身体摆动频率：将同步化至L4期线虫培养至成虫期，线虫每运动1个正弦周期为1次完整运动，观察线虫30 s运动次数并记录。

3）线虫48 h后存活率：将同步化至L4期的线虫分别置于含不同浓度POE的NGM板中，每板线虫约30条，20 ℃培养48 h，观察计数线虫存活数量。

1.7　ROS水平检测

根据叶永丽等[25]的方法并稍加改动。将同步化至L4期线虫给药处理48 h后，用M9缓冲液冲洗3次，加入10 μL H_2DCFDA，20 ℃避光孵育30 min，用2 g/dL叠氮化钠固定，采用荧光倒置显微镜观察。

1.8　SOD酶活力和MDA质量摩尔浓度测定

将同步化至L4期的线虫给药3 d后，用M9缓冲液冰浴匀浆，4 ℃、4 000 r/min离心1 min，上清液用M9缓冲液重悬，破碎虫体，4 ℃、3 000 r/min离心10 min，上清液用BCA蛋白质定量试剂盒测定蛋白质浓度，再按照SOD试剂盒、MDA测试盒说明书进行测定。

1.9　实时荧光定量PCR

将同步化至L4期的线虫给药处理4 d后，采用Trizol法提取线虫总RNA，在逆转录酶催化下合成cDNA。荧光定量PCR仪检测mRNA表达水平，以*act-1*基因作为内参，由上海生工生物工程股份有限公司按标准设计并合成引物，引物序列见表1。

表1　引物序列

Table 1　Primer sequences

引物名称	碱基序列（5′—3′）
fat2-F	CAAAGCAGCAATCCCTGAGC
fat2-R	CATCCAAGAAGCCCGATCCA
nhr80-F	ATCACCGACGAGATCATGCC
nhr80-R	TAGGTGACGTTTCGCCTCTG
sbp1-F	AGCATCAGGTGTGGTGTCTG
sbp1-R	TCCAGTAGGGTTTCGATGCG
fat5-F	TGCCCACCTTCATTCCAGTC
fat5-R	CATGTAGCGTGGAGGGTGAA

1.10　数据处理与统计分析

数据结果以平均数±标准差表示。使用one-way ANOVA分析来评估不同线虫检测组之间的差异。使用GraphPad Prism 8.3.0对数据进行处理及分析，$P<0.05$为差异显著，$P<0.01$为差异极显著。

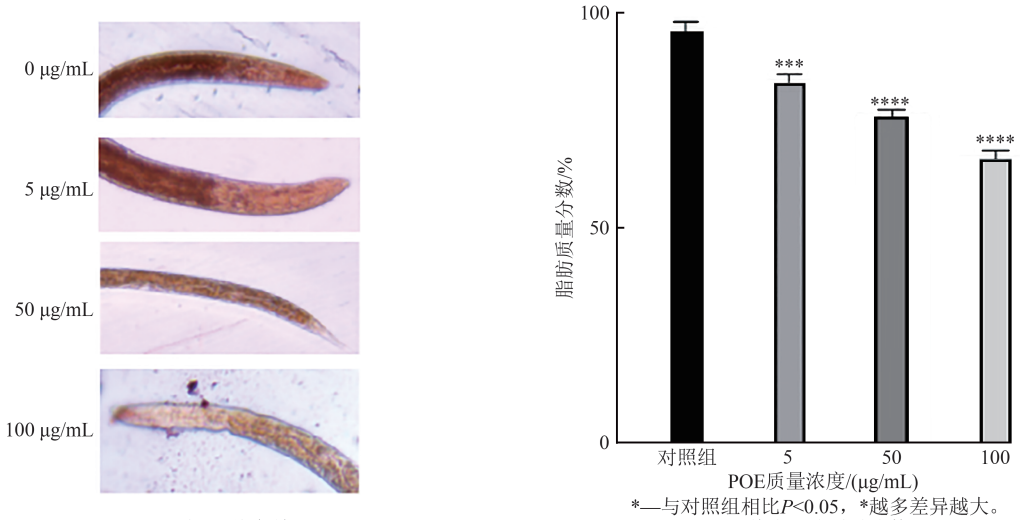
2　结果与讨论

2.1　肠道脂肪质量分数分析

在线虫体内，脂肪主要沉积在肠道和皮下组织[19,26]。油红O染色评估与甘油三酯含量有良好的相关性[27]。由图1可知，经油红染料处理后，线虫肠道被染成红色。不同质量浓度的POE处理的线虫染色程度比对照组浅，说明POE能够减少线虫的脂肪质量分数。通过Image J软件进行荧光强度分析，发现与对照组相比，当POE质量浓度为5 μg/mL时，线虫的脂肪质量分数减少，当POE质量浓度为50、100 μg/mL时，线虫的脂肪质量分数分别降低了20.78%和31.22%（$P<0.01$）。试验组的脂肪质量分数降低，说明POE可能具有减缓线虫体内脂肪积聚的功能。此外，由图2可知，经低质量浓度POE处理的线虫TG相对含量降低不显著。随着POE质量浓度的增加，TG相对含量显著降低，分别减少了21.79%和31.43%（$P<0.01$），表明POE在降低秀丽隐杆线虫的TG相对含量方面具有显著作用。综上，POE在减缓线虫体内脂肪积聚方面具有一定作用。

2.2　对秀丽隐杆线虫生理指标的影响

由表2可知，线虫L1—L4时期发育48 h后存活率均为100%。Sun等[28]研究表明，在一定程度上，运动能力反映了机体能量代谢。POE对线虫身体弯曲频率无显著影响，在高质量浓度POE处



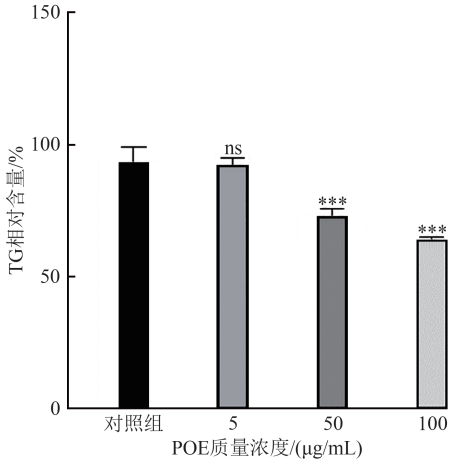
(a) 油红O染色结果

*—与对照组相比P<0.05，*越多差异越大。

(b) 线虫脂肪质量分数

图 1　POE 处理对线虫体内脂肪质量分数的影响

Fig. 1　Effect of POE treatment on mass fraction of fat in *C. elegans*



*—与对照组相比 P<0.05，*越多差异越大；ns—与对照组相比 P>0.05。

图 2　POE 处理对线虫体内 TG 相对含量的影响

Fig. 2　Effect of POE treatment on the relative content of TG in *C. elegans*

理下也不影响线虫的运动能力。POE 作用后，线虫的体长和体宽也无显著差异。因此，POE 有效抑制线虫脂肪沉积的作用可能与调节线虫脂肪代谢或过氧化等途径息息相关[29]。

2.3　对秀丽隐杆线虫体内 ROS 水平的影响

活性氧（reactive oxygen species，ROS）累积会诱导产生氧化应激，机体对其产生反应而导致机体产生神经毒性[30-31]。但在正常情况下生物体内会维持氧化动态平衡，机体内存在酶抗氧化系统和非酶抗氧化系统，两者共同作用，从而及时清除 ROS[32]。由图 3 可知，与对照组相比，试验组荧光强度明显减弱，且随着 POE 质量浓度的增加，荧光强度减弱。当 POE 质量浓度为 5 μg/mL 时，相比于对照组，POE 降低体内活性氧水平不显著，ROS 水平降低了 10.78%。当 POE 质量浓度为 50、100 μg/mL 时，线虫体内 ROS 水平降低极显著（P<0.01），与对照相比分别降低了 20.65% 和 31.60%，说明 POE 可能具有清除秀丽隐杆线虫体内 ROS 的作用。

2.4　对秀丽隐杆线虫体内 SOD 酶活力的影响

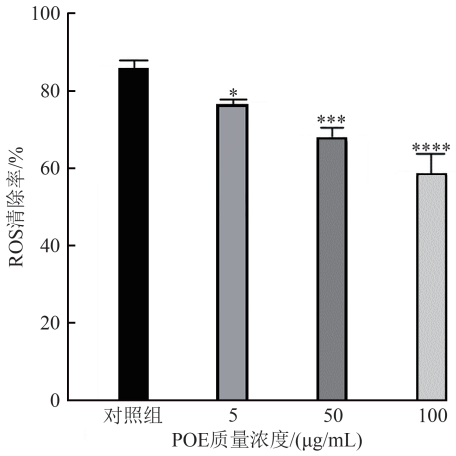
SOD 是机体内重要的抗氧化酶，负责清除机体自由基，发挥抗氧化作用[33]。由图 4 可知，POE 作用后，与对照组相比，不同质量浓度试验组的 SOD 酶活力分别提升了 10.78%、28.41% 和 39.21%。

表 2　POE 对秀丽隐杆线虫生理指标的影响

Table 2　Effects of POE on physiological indexes of *C. elegans*

POE 质量浓度/（μg/mL）	身体摆动频率/（次数/min）	48 h 存活率/%	体长/μm	体宽/μm
0	40.72±5.84	100	850.24±70.26	50.31±3.78
5	42.13±4.76	100	876.53±69.74	51.89±2.86
50	45.57±3.87	100	901.58±82.60	54.17±2.79
100	46.38±5.32	100	890.87±70.38	53.27±1.58

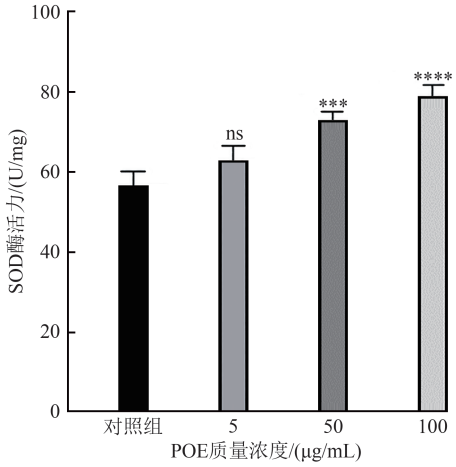
与对照组相比，POE-5 μg/mL有略微提升但无明显变化，POE-100 μg/mL和POE-50 μg/mL的$P<0.01$，具有质量浓度依赖趋势，表明POE能显著增加线虫体内SOD酶活力以抵御氧化应激。



*—与对照组相比$P<0.05$，*越多差异越大。

图3　POE处理对秀丽隐杆线虫ROS表达水平影响

Fig. 3　Effect of POE on ROS level in *C. elegans*



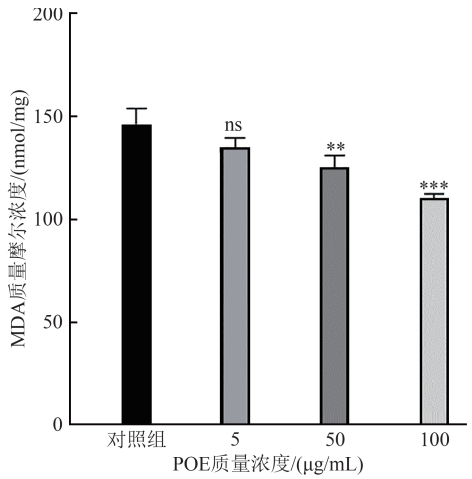
*—与对照组相比$P<0.05$，*越多差异越大；ns—与对照组相比$P>0.05$。

图4　POE对秀丽隐杆线虫体内SOD酶活的影响

Fig. 4　Effect of POE on SOD activity in *C. elegans*

2.5　对秀丽隐杆线虫体内MDA质量摩尔浓度的影响

MDA是ROS攻击生物膜产生的脂质过氧化产物[34-35]。因此，线虫体内MDA质量摩尔浓度越高，说明机体过氧化程度越严重[36]。由图5可知，试验组的MDA质量摩尔浓度均呈现一定程度的下降，与对照组相比，低质量浓度POE组的效果与SOD防御水平有相似情况，可能因低质量浓度POE无明显抵御能力，但也能一定程度抵御氧化应激。较高质量浓度与高质量浓度处理组能够显著降低秀丽隐杆线虫体内MDA质量摩尔浓度（$P<0.05$）。



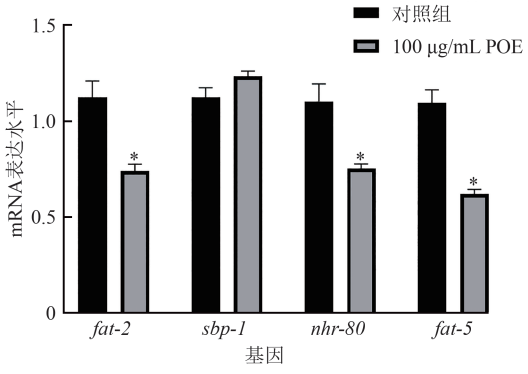
*—与对照组相比$P<0.05$，*越多差异越大；ns—与对照组相比$P>0.05$。

图5　POE对秀丽隐杆线虫体内MDA质量摩尔浓度的影响

Fig. 5　Effect of POE on MDA molality in *C. elegans*

2.6　对秀丽隐杆线虫体内脂肪相关基因表达水平的影响

由图6可知，与对照组相比，试验组线虫的*fat-2*、*fat-5*、*nhr-80* mRNA表达水平分别下调了34.14%、43.25%、31.80%，*sbp-1* mRNA表达水平上调了9.76%（$P<0.05$）。



*—与对照组相比$P<0.05$。

图6　脂肪相关基因表达水平

Fig. 6　Expression levels of fat-related genes

3　结论

研究表明，植物甾醇油脂体乳液（POE）对线虫存活率、体长、体宽、运动能力等生理指标均无

抑制作用，且在一定程度上能够提升线虫抗氧化应激能力。经油红O染料对线虫肠道进行染色处理，通过表观颜色变化对比和进一步进行灰度分析定量，确证了POE能减少线虫脂肪质量分数。此外，对线虫体内甘油三酯相对含量进行测定，再一次确定了POE可以减少脂肪沉积，且呈现质量浓度依赖趋势。选取脂肪代谢相关基因*fat-2*、*sbp-1*、*nhr-80*、*fat-5*进行检测转录水平表达发现，POE可以抑制*fat-2*、*nhr-80*、*fat-5*的基因表达，上调*sbp-1*的基因表达。综上，POE具有降脂活性，但其脂代谢调节途径在机体内错综复杂，有待进一步研究。

参考文献

[1] MÜLLER T D，BLÜHER M，TSCHÖP M H，et al. Anti-obesity drug discovery：advances and challenges[J]. Nature Reviews Drug Discovery，2022，21(3)：201-223.

[2] SRIVASTAVA G，APOVIAN C. Future pharmacotherapy for obesity：new anti-obesity drugs on the horizon[J]. Current Obesity Reports，2018，7(2)：147-161.

[3] CHEN J X，ZHAO H H，YANG Y，et al. Lipid-lowering and antioxidant activities of Jiang-Zhi-Ning in traditional Chinese medicine[J]. Journal of Ethnopharmacology，2011，134(3)：919-930.

[4] DUAN Y，GUO F Q，LI C，et al. Aqueous extract of fermented *Eucommia ulmoides* leaves alleviates hyperlipidemia by maintaining gut homeostasis and modulating metabolism in high-fat diet fed rats[J]. Phytomedicine，2024，128：155291.

[5] JIA X H，XU M L，YANG A G，et al. Reducing effect of farnesylquinone on lipid mass in *C. elegans* by modulating lipid metabolism[J]. Marine Drugs，2019，17(6)：336.

[6] YAN J，XUE Q Y，CHEN W Y，et al. Probiotic-fermented rice buckwheat alleviates high-fat diet-induced hyperlipidemia in mice by suppressing lipid accumulation and modulating gut microbiota[J]. Food Research International，2022，155：111125.

[7] YU X X，LI H，LIN D F，et al. Ginsenoside prolongs the lifespan of *C. elegans via* lipid metabolism and activating the stress response signaling pathway[J]. International Journal of Molecular Sciences，2021，22(18)：9668.

[8] RUBIO-TOMÁS T，TAVERNARAKIS N. Lipid metabolism and ageing in *Caenorhabditis elegans*：a complex interplay[J]. Biogerontology，2022，23(5)：541-557.

[9] XIAO B，CHEN S，HUANG Q Q，et al. The lipid lowering and antioxidative stress potential of polysaccharide from *Auricularia auricula* prepared by enzymatic method[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2021，187：651-663.

[10] YU D Y，WANG N，YU Y J，et al. Effects of electrochemical treatment and epigallocatechin-3-gallate on emulsification，rheological and oxidation stability of soybean oil body[J]. Journal of Food Engineering，2024，366：111832.

[11] YANG X F，WU Y Y，LIU Y，et al. Digestive characteristics of oil body extracted from soybean aqueous extract at different pHs[J]. Food Research International，2022，161：111828.

[12] GAN C F，LIU Q，ZHANG Y，et al. A novel phytosterols delivery system based on sodium caseinate-pectin soluble complexes：improving stability and bioaccessibility[J]. Food Hydrocolloids，2022，124：107295.

[13] TEIXEIRA F S，VIDIGAL S S M P，PIMENTEL L L，et al. Phytosterols and novel triterpenes recovered from industrial fermentation coproducts exert *in vitro* anti-inflammatory activity in macrophages[J]. Pharmaceuticals，2021，14(6)：583.

[14] SALGADO-ROMÁN J M，LOZA-CORNEJO S，HERNÁNDEZ-SOTO R，et al. Phytosterol extract decreases the oxidative damage in the brains of diabetic db/db mice[J]. Metabolic Syndrome and Related Disorders，2021，19(5)：305-311.

[15] GROSSHAGAUER S，STEINSCHADEN R，PIGNITTER M. Strategies to increase the oxidative stability of cold pressed oils[J]. LWT-Food Science and Technology，2019，106：72-77.

[16] 佟平，臧凤，陈红兵，等. 禽蛋蛋白质功能成分的抗氧化研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(4)：16-23.
TONG P，ZANG F，CHEN H B，et al. A comprehensive review on antioxidant activity of functional ingredients derived from egg proteins[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(4)：16-23.(in Chinese)

[17] WATTS J L，RISTOW M. Lipid and carbohydrate metabolism in *Caenorhabditis elegans*[J]. Genetics，2017，207(2)：413-446.

[18] LIN C X，LIN Y Z，CHEN Y，et al. Effects of *Momordica* saponin extract on alleviating fat accumulation in *Caenorhabditis elegans*[J]. Food & Function，2019，10(6)：3237-3251.

[19] XIAO X，CLARK J M，PARK Y. Potential contribution of insecticide exposure and development of obesity and type 2 diabetes[J]. Food and Chemical Toxicology，2017，105：456-474.

[20] ARANAZ P，PEÑA A，VETTORAZZI A，et al. *Grifola*

frondosa（Maitake）extract reduces fat accumulation and improves health span in *C. elegans* through the *DAF-16/FOXO* and *SKN-1/NRF2* signalling pathways［J］. Nutrients，2021，13(11)：3968.

［21］WU Z Q，XIAO Y，ZHOU F，et al. Pasteurized *Akkermansia muciniphila* reduces fat accumulation *via nhr-49*-mediated nuclear hormone signaling pathway in *Caenorhabditis elegans*［J］. Molecules，2022，27(19)：6159.

［22］BAN F F，HU L B，ZHOU X H，et al. Inverse molecular docking reveals a novel function of thymol：inhibition of fat deposition induced by high-dose glucose in *Caenorhabditis elegans*［J］. Food Science & Nutrition，2021，9(8)：4243-4253.

［23］ZHU J Y，WANG H，MIAO L M，et al. Curcumin-loaded oil body emulsions prepared by an ultrasonic and pH-driven method：fundamental properties，stability，and digestion characteristics［J］. Ultrasonics Sonochemistry，2023，101：106711.

［24］QIN X J，WANG W Q，CHU W H. Antioxidant and reducing lipid accumulation effects of rutin in *Caenorhabditis elegans*［J］. BioFactors，2021，47(4)：686-693.

［25］叶永丽，张晓娟，唐莉莉，等. 基于氧化应激和线粒体功能障碍的伏马毒素B_1诱导线虫神经毒性机制［J］. 食品与生物技术学报，2024，43(3)：26-35.

YE Y L，ZHANG X J，TANG L L，et al. Mechanism investigation of neurotoxicity of *Caenorhabditis elegans* induced by fumonaxin B_1-mediated oxidative stress and mitochondrial dysfunction［J］. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(3)：26-35.(in Chinese)

［26］JONES K T，ASHRAFI K. *Caenorhabditis elegans* as an emerging model for studying the basic biology of obesity［J］. Disease Models & Mechanisms，2009，2(5/6)：224-229.

［27］O'ROURKE E J，SOUKAS A A，CARR C E，et al. *C. elegans* major fats are stored in vesicles distinct from lysosome-related organelles［J］. Cell Metabolism，2009，10(5)：430-435.

［28］SUN Q C，YUE Y R，SHEN P Y，et al. Cranberry product decreases fat accumulation in *Caenorhabditis elegans*［J］. Journal of Medicinal Food，2016，19(4)：427-433.

［29］BAI J，ZHU Y，LI J，et al. Effects of bitter melon saponin on the glucose and lipid metabolism in HepG2 cell and *C. elegans*［J］. Journal of Food Quality，2020，2020(1)：8860356.

［30］XU J，LI J M，FENG Z，et al. Neurotoxic effects of nonylphenol：a review［J］. Wiener Klinische Wochenschrift，2013，125(3/4)：61-70.

［31］KUDRYAVTSEVA A V，KRASNOV G S，DMITRIEV A A，et al. Mitochondrial dysfunction and oxidative stress in aging and cancer［J］. Oncotarget，2016，7(29)：44879-44905.

［32］TANG D X，LIU K，YANG J Y，et al. Artificial nonenzymatic antioxidant Prussian blue/KGM-BSA nanocomposite hydrogel dressing as ROS scavenging for diabetic wound healing［J］. International Journal of Biological Macromolecules，2024，266：131106.

［33］YOU X Y，XI J，CAO Y Y，et al. 4-Bromodiphenyl ether induces germ cell apoptosis by induction of ROS and DNA damage in *Caenorhabditis elegans*［J］. Toxicological Sciences，2017，157(2)：510-518.

［34］DELLI BOVI A P，MARCIANO F，MANDATO C，et al. Oxidative stress in non-alcoholic fatty liver disease. an updated mini review［J］. Frontiers in Medicine，2021，8：595371.

［35］HE L J，ZHANG Y P，CAO Q Q，et al. Hepatic oxidative stress and cell death influenced by dietary lipid levels in a fresh teleost［J］. Antioxidants，2024，13(7)：808.

［36］YU S C，CHIU W C，LOE P Y，et al. Effects of hydroxysafflor yellow A（HSYA）on UVA-induced damage in HaCaT keratinocytes［J］. International Journal of Molecular Sciences，2024，25(14)：7573.