



# 基于 SDS 诱导果蝇肠炎模型的番石榴多糖 提取及活性组分评价综合实验设计

李美英, 罗皓琳, 王 弘, 徐振林, 孙远明\*

(华南农业大学 食品学院, 广州 510000)

**摘要:** 黑腹果蝇是评价天然产物活性的理想模型之一。该研究构建了一种 SDS 诱导的果蝇肠炎模型, 用于探究不同提取方法(传统水提醇沉法和复合酶解辅助低共熔溶剂法)及经分离纯化后不同番石榴组分对肠炎的改善作用。结果表明, 复合酶解辅助低共熔溶剂法提取的番石榴多糖显著提高了肠炎果蝇存活率, 并降低了肠壁通透性。进一步分离纯化后, GPB-1 组分在延长果蝇寿命、降低肠壁通透性、恢复肠道长度及提高抗氧化能力方面均优于 GPA 组分。该研究以果蝇为模型, 建立了天然产物活性评价体系, 涵盖了多糖提取、分离、纯化以及活性评价的全流程, 并结合了生物科学、食品营养学、食品化学、仪器分析等多学科知识, 具有较强的综合性。该体系不仅有助于学生掌握天然产物提取工艺、活性评价以及数据分析方法, 还为教学提供了一个低成本、伦理友好的实践平台, 促进了学生的知识迁移和综合素养提升。

**关键词:** 综合实验设计; 黑腹果蝇; 番石榴多糖; 肠道健康; 活性评价

中图分类号: TS252.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20250253

## A Comprehensive Experimental Design for the Extraction of *Guava* Polysaccharides and the Evaluation of Active Components Using a *Drosophila* Enteritis Model Induced by SDS

LI Meiyong, LUO Haolin, WANG Hong, XU Zhenlin, SUN Yuanming\*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** *Drosophila melanogaster* is one of the ideal models for evaluating the activity of natural products. In this study, a dextran sulfate sodium (SDS)-induced intestinal inflammation model in *Drosophila* is established to investigate the ameliorative effects on intestinal inflammation of guava extracts obtained by different methods (traditional water extraction and alcohol precipitation versus a complex enzymatic hydrolysis-assisted deep eutectic solvent method) as well as of different fractions after separation and purification. The results show that the guava polysaccharides extracted by the complex enzymatic hydrolysis-assisted deep eutectic solvent method significantly increases the survival rate of SDS-treated flies and reduces the intestinal barrier permeability. After further separation and purification, the GPB-1 fraction outperforms the GPA fraction in prolonging lifespan, reducing intestinal barrier permeability, restoring gut length and enhancing antioxidant capacity. A comprehensive evaluation system for natural product activity is established using *Drosophila* as a model, covering the entire workflow from polysaccharide extraction, separation, purification to activity evaluation. It integrates multidisciplinary knowledge from biological science, food nutrition, food chemistry and instrumental analysis. This system not only helps students master natural product extraction techniques, activity evaluation methods and data analysis, but also provides a low-cost and ethically friendly platform for hands-on training, thereby promoting students' knowledge transfer and comprehensive skill improvement.

**Key words:** comprehensive experimental design; *drosophila melanogaster*; guava polysaccharides; gut health; activity evaluation

收稿日期: 2025-04-27

基金项目: 国家“十四五”重点研发项目(2023YFF1104203); 广东省重点研发项目(2022B0202020004); 国家自然科学基金(32472339)。

作者简介: 李美英, 博士, 副教授, 主要从事食品加工与营养方面的研究。E-mail: lmy1982@scau.edu.cn

\* 通信作者: 孙远明, 博士, 教授, 主要从事食品安全与营养方面的研究。E-mail: ymsun@scau.edu.cn

果蝇(*Drosophila melanogaster*)作为经典模式生物, 凭借其高度保守的生物学特性、丰富的遗传工具、低成本高效率的实验体系以及与人类疾病机制的高度相似性, 成为功能活性评价的理想模型。近年来, 果蝇在构建肠炎模型方面展现出显著优势, 是研究肠道炎症及相关疾病的理想实验生物。首先, 果蝇的肠道结构与哺乳动物高度相似<sup>[1]</sup>, 包括分段结构(前肠、中肠和后肠)以及相似的细胞类型(如肠上皮细胞和干细胞), 为研究肠道生理和病理提供了可靠基础。其次, 果蝇的先天免疫系统与哺乳动物高度保守, 其 Toll 通路和免疫缺陷通路(immune deficiency pathway, IMD)分别对应哺乳动物的 Toll 样受体(Toll-like receptor, TLR)和核因子  $\kappa$ B(nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells, NF- $\kappa$ B) 通路<sup>[2-4]</sup>, 能够有效模拟肠道炎症的免疫反应机制。此外, 果蝇生命周期短、繁殖快、成本低, 适合大规模实验和遗传筛选<sup>[5]</sup>。

多糖提取纯化及活性评价是食品专业学生培养专业素养的重要内容。首先, 多糖作为功能性食品的重要成分<sup>[6-7]</sup>, 其提取纯化技术(如酶辅助提取、柱层析纯化等)能强化学生的实验操作能力和工艺优化思维, 掌握现代食品分析仪器的使用原理。其次, 活性评价涉及抗氧化、免疫调节等生物活性检测方法, 可帮助学生建立“结构-功能”关联性研究理念, 提升其跨学科整合能力。通过完整流程实践, 学生不仅能深入理解食品组分与健康效应的关系, 更能培养严谨的科研思维 and 创新能力, 为开发新型功能食品奠定基础。

番石榴(学名: *Psidium guajava* L., 也称 *Guava*)作为中国岭南特色水果之一, 具有止泻、消炎、收敛、降血糖等功效<sup>[8]</sup>, 在几个世纪以来一直被用作保健食品和中药。本实验以黑腹果蝇作为模型生物建立了天然产物活性评价体系, 用以探究番石榴多糖抗肠炎活性。首先以寿命与肠壁通透性指标来比较不同提取方法及纯化后不同番石榴多糖组分的抗肠炎活性, 得出最适干预浓度, 进而通过测定果蝇的肠道长度、总超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)含量来探究番石榴多糖对果蝇肠炎的影响。本实验设计有助于学生熟悉果蝇实验基本操作, 提高其数据分析与科学思维能力, 了解多糖等天然产物的提取与功能评价技术。

## 1 试剂与仪器

试剂: 番石榴新鲜果实(廉江河唇番石榴果园); 玉米粉(涑水金谷粮油食品有限公司); 燕麦胚芽(广州萃取生物科技有限公司); 酵母(安琪酵母股份有限公司); 蔗糖(太古糖业有限公司); 亮蓝、氯化胆碱、木瓜蛋白酶(上海麦克林生化科技股份有限公司); 1, 2-丙二醇、果胶酶、纤维素酶(上海源叶生物科技有限公司); 丙酸、苯酚、无水乙醇、葡萄糖(天津大茂化学试剂厂); 十二烷基硫酸钠(SDS)、琼脂(德国 Biofrox 公司); 4% 多聚甲醛(兰杰柯科技有限公司)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)测定试剂盒、过氧化氢酶(CAT)测定试剂盒、丙二醛(MDA)测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)。

仪器: VersaMAx 光栅型酶标仪(上海美谷分子仪器有限公司); TGL-20bR 高速冷冻离心机(上海安亭科学仪器厂); Optec tp1200 显微镜(重庆奥特光学仪器有限责任公司); DK-600 电热恒温水浴箱(上海精宏设备有限公司); 人工气候箱(上海一恒科学仪器有限公司); 层析柱(北京瑞达恒辉科技发展有限公司)。

## 2 样品制备与提取方法

### 2.1 番石榴多糖的提取

#### 2.1.1 水提醇沉法

参考文献 [9] 采用响应面法优化的水提醇沉法。称取 50 g 番石榴粉末于烧杯中, 加入三级水, 料液比为 1 : 49 (g/mL), 在 67 °C 水浴锅中提取 59 min 后, 于 12000 r/min 离心 10 min, 取上清液加入 4 倍无水乙醇在 4 °C 冰箱中醇沉 48 h, 12000 r/min 离心 10 min 后, 取沉淀复溶于水中, 使用截留量为 3 kDa 的透析袋透析 72 h, 收集样液真空冷冻干燥, 得到 GP-1, 并计算提取率。

#### 2.1.2 复合酶解辅助低共熔溶剂法

称取 50 g 番石榴粉末与 1.5 g 复合酶(果胶酶、木瓜蛋白酶、纤维素酶质量比=1 : 1 : 1)于烧杯中, 加入含水量为 50% 的低共熔溶剂(该低共熔溶剂由氯化胆碱和 1,2-丙二醇按摩尔比 1 : 2 混合而成), 料液比为 1 : 34.5 g/mL, 向溶液中加入 1 mol/L 柠檬酸调节 pH 为 2.8, 加入 0.65 g 果胶酶, 在 35 °C 恒温水浴锅提取 30 min 后, 向溶液

中加入 1.0 mol/L  $\text{NaHCO}_3$  溶液调节 pH 值为 6.0, 加入 0.95 g 纤维素酶与 0.35 g 木瓜蛋白酶, 调整水浴锅温度至 30 °C 并继续提取 40 min 后, 100 °C 灭酶 5 min, 于 12000 r/min 离心 10 min, 取上清液加入 4 倍无水乙醇在 4 °C 冰箱中醇沉 48 h, 12000 r/min 离心 10 min, 取沉淀复溶于水, 使用截留量为 3 kDa 的透析袋透析 72 h, 收集样液真空冷冻干燥, 得到 GP-2, 并计算提取率。

## 2.2 多糖理化指标测定

### 2.2.1 总糖含量测定

采用苯酚硫酸法测定总糖含量<sup>[10]</sup>。

### 2.2.2 蛋白质含量测定

采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量<sup>[11]</sup>。

## 2.3 果蝇饲养及肠炎果蝇模型的建立

### 2.3.1 实验动物及饲养

野生型 Canton-S 品系果蝇从上海生物化学与细胞生物研究所获得, 果蝇饲养于人工气候箱中(温度设置为 25 °C、湿度设置为 60%), 每天 12 h 白天, 12 h 黑夜, 白天-黑夜往复循环。

### 2.3.2 果蝇繁殖培养基的制作

果蝇繁殖基配方包括丙酸 2.5 mL、玉米粉 40 g、燕麦胚芽 15 g、酵母 20 g、琼脂 5 g、蔗糖 25 g、水 600 mL。

用烧杯称取玉米粉、蔗糖、酵母、燕麦胚芽、琼脂, 转移入铁锅中, 再加入 600 mL 三级水。使用电磁炉 1000 W 功率加热 3 min, 再使用 300 W 功率加热 12 min, 期间保持沸腾状态, 并不断搅拌。煮制完毕后, 放冷 2 min, 再往培养基里加入 2.5 mL 丙酸, 搅匀获得果蝇基础培养基, 倒入果蝇培养管, 待用。

### 2.3.3 果蝇实验培养基的制作

在繁殖培养基的基础上, 按质量比加入番石榴多糖, 配置成含 0.3%(低剂量, L)、0.6%(中剂量, M)、1.2%(高剂量, H)的多糖培养基作为实验培养基。

## 2.4 不同提取方法所得番石榴多糖对肠炎果蝇存活率的影响

选择 8 h 内新生雌性果蝇为实验对象, 分别设置空白组(NC-SUC)、模型组(NC-SDS)以及多糖组(GP1-SDS、GP2-SDS, 干预浓度为 1.2%), 并预先配置 5% 蔗糖溶液、0.6% SDS、5% 蔗糖溶液。将不同组别果蝇使用对应培养基饲养 3 d 后, 将其放置于空管内, 饥饿 2 h, 在新培养管底部垫

3 层滤纸, 每管均匀添加 200  $\mu\text{L}$  配置好的各溶液。将饥饿后的果蝇导入培养管内, 每管 25 只, 每个组别都设置 3 组平行。每 24 h 更换滤纸记录死亡果蝇数, 直至所有果蝇全部死亡。

## 2.5 不同提取方法所得番石榴多糖对肠炎果蝇肠壁通透性的影响

选择 8 h 内新生雌性果蝇为实验对象, 分别设置空白组(NC-SUC)、模型组(NC-SDS)以及多糖组(GP1-SDS、GP2-SDS, 干预浓度为 1.2%), 并预先配置 5% 蔗糖溶液、0.6% SDS、5% 蔗糖溶液。将不同组别果蝇使用对应培养基饲养 3 d 后, 将其放置于空管内, 饥饿 2 h, 在新培养管底部垫 3 层滤纸, 每管均匀添加 200  $\mu\text{L}$  配置好的各溶液。将饥饿后的果蝇导入培养管内培养 36 h 后转移至空管内饥饿 2 h。配置 2.5% 亮蓝、5% 蔗糖溶液, 在果蝇管底部垫 3 层滤纸, 每管加 200  $\mu\text{L}$  溶液, 将饥饿后的果蝇导入管内, 饲养 24 h, 每组随机取 15 只果蝇于 2 mL 离心管, 加入 1.5 mL 超纯水并加入 5 颗铁珠, 于 4 °C 下研磨 5 min 后, 4 °C 下离心(12000 r/min, 10 min), 取上清液于 625 nm 处检测各组果蝇吸光度值来量化果蝇体内浸染程度。

## 2.6 番石榴多糖的分离纯化

### 2.6.1 DEAE-52 纤维柱纯化

将经过预处理的 DEAE-52 纤维素装入柱层析, 将 500 mg 待纯化多糖(GP2)溶于 50 mL 水中, 离心后取上清液经过 0.22  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤后环形加入至填料上方, 设置流速为 2 mL/min, 分别用超纯水和 0.3、0.9、2.0 mol/L NaCl 作为洗脱液进行洗脱。每管收集 10 mL, 超纯水洗脱液收集 30 管, 其他洗脱液收集 35 管, 收集液隔管用苯酚硫酸法跟踪检测, 以管号为横坐标, 各管吸光度为纵坐标绘制洗脱曲线, 收集组分用截留量为 3 kDa 的透析袋透析 72 h, 并真空冷冻干燥。

### 2.6.2 Sepharose CL-6B 凝胶柱纯化

对经过 DEAE-52 纤维柱纯化得到的多糖通过 Sepharose CL-6B 凝胶柱进行进一步纯化, 将经过预处理的 Sepharose CL-6B 凝胶装入层析柱内, 将 50 mg 待纯化多糖(GPB)溶于 3 mL 超纯水中, 经过 0.22  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤后环形加入至填料上方, 以超纯水为洗脱液, 流速为 0.2 mL/min, 每管收集 4 mL, 共收集 20 管, 其余操作同章节 2.6.1。

## 2.7 番石榴多糖不同组分对肠炎果蝇存活率的影响

选择 8 h 内新生雌性果蝇为实验对象, 分别设

置空白组(NC-SUC)、模型组(NC-SDS)、GPA组(L-GPA-SDS、M-GPA-SDS、H-GPA-SDS)以及GPB1组(L-GPB1-SDS、M-GPB1-SDS、H-GPB1-SDS),其余操作同章节2.4。

### 2.8 番石榴多糖不同组分对肠炎果蝇肠壁通透性的影响

选择8h内新生雌性果蝇为实验对象,分别设置空白组(NC-SUC)、模型组(NC-SDS)、GPA组(L-GPA-SDS、M-GPA-SDS、H-GPA-SDS)以及GPB1组(L-GPB1-SDS、M-GPB1-SDS、H-GPB1-SDS),其余操作同章节2.5。

### 2.9 番石榴多糖 GPB1 对肠炎果蝇肠道形态的影响

选择8h内新生雌性果蝇为实验对象,分别设置空白组(NC-SUC)、模型组(NC-SDS)、多糖组(M-GPB1-SDS),并预先配置5%蔗糖溶液、0.6% SDS、5%蔗糖溶液。将不同组别果蝇使用对应培养基饲养3d后,将其放置于空管内,饥饿2h,在新培养管底部垫3层滤纸,每管均匀添加200 $\mu$ L配置好的各溶液。将饥饿后的果蝇导入培养管内培养36h后转移至空管内饥饿2h。配置2.5%亮蓝、5%蔗糖溶液,在果蝇管底部垫3层滤纸,每管加200 $\mu$ L溶液,将饥饿后的果蝇导入管内,饲养24h,在冷PBS中使用镊子夹住果蝇腹部末端将肠道扯出,并将马氏管、脂肪体等其他器官去除,同样步骤解剖10~12条肠道置于4%多聚甲醛中固定30min,然后转移至含70%甘油的载玻片上,用Image J软件统计各组果蝇肠道长度。

### 2.10 果蝇氧化应激指标测定

参考章节2.5培养果蝇,严格按照生产厂家使用试剂盒检测果蝇T-SOD、CAT以及MDA含量。

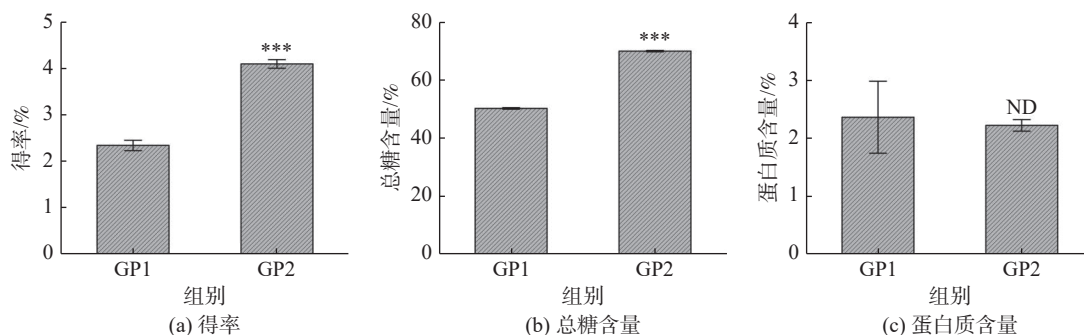
### 2.11 数据分析

所有实验进行3次以上重复,使用SPSS Statistic 26软件对实验结果进行统计分析。采用单因素方差分析和Tukey事后检验分析组间差异的统计意义,数据均以均数+标准误差(Mean+SEM)表示, $p<0.05$ 或 $p<0.01$ 为差异达到显著水平或极显著水平,用Origin 2021软件绘图。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同提取方法对番石榴多糖得率及成分的影响

相较于传统水提醇沉法工艺,复合酶解辅助低共熔溶剂提取法在多糖得率,总糖及蛋白质含量上展现出显著优势,如图1所示。实验数据显示,该方法将多糖得率从 $2.34\pm 0.11\%$ 提升至 $4.10\pm 0.09\%$ ,增长75.2%,如图1(a)所示;总糖含量从 $50.240\pm 0.267\%$ 显著提高至 $69.970\pm 0.236\%$ ,增长39.3%,如图1(b)所示;同时成功将蛋白质残留量从 $2.36\pm 0.62\%$ 降低至 $2.22\pm 0.10\%$ ,如图1(c)所示。这种性能提升可能源自两个方面:一方面,复合酶体系通过协同作用高效降解番石榴细胞壁结构,促进胞内多糖释放;另一方面,基于氯化胆碱/1,2-丙二醇组成的低共熔溶剂因其粘度特性与番石榴多糖的粘度相近<sup>[12]</sup>,可实现更精准的选择性萃取。



注: \*\*\*表示  $P<0.001$

图1 不同提取方法对番石榴多糖得率、总糖含量、蛋白质含量的影响对比图

### 3.2 不同提取方法番石榴多糖对肠炎果蝇存活率的影响

十二烷基硫酸钠(SDS)通过破坏细胞膜完整性、诱导蛋白质变性、触发氧化应激等多途径协

同作用,最终引发果蝇的生理功能紊乱并导致死亡<sup>[13]</sup>。实验数据显示,果蝇存活时间的长短与和肠道组织损伤程度呈正相关。在干预实验中,相较于模型组(NC-SDS),GP1与GP2干预后果蝇的

存活曲线显著右移, 如图 2 所示。同时, GP2 可以显著提高肠炎果蝇的平均寿命、中位寿命以及最高寿命, 其保护效果优于 GP1(表 1), 具体体现为平均寿命、中位寿命以及最高寿命相较模型组 (NC-SDS) 分别延长了 60.0%、60.0% 和 48.0%, 如表 1 所示。

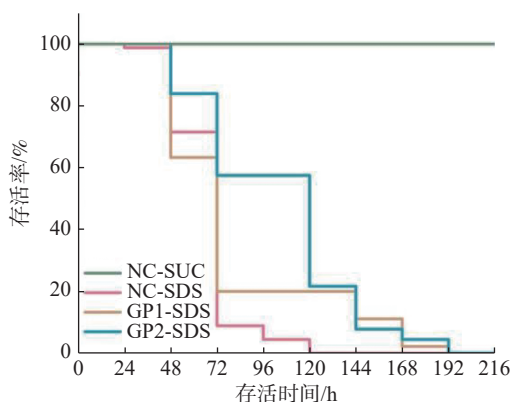


图 2 不同方法所得番石榴多糖对肠炎果蝇存活率的影响对比图

表 1 不同方法所得番石榴多糖对肠炎果蝇寿命的影响

| 组别      | 平均寿命/h         | 中位寿命/h       | 最高寿命/h        |
|---------|----------------|--------------|---------------|
| NC-SDS  | 62.77±7.93     | 60.00±12.00  | 104.00±27.71  |
| GP1-SDS | 79.60±7.49**   | 64.00±13.86  | 160.00±24.98* |
| GP2-SDS | 100.45±5.81*** | 96.00±24.00* | 152.00±24.98* |

注: \*表示 $P<0.05$ ; \*\*表示 $P<0.01$ ; \*\*\*表示 $P<0.001$ (与模型组NC-SDS进行比较)

### 3.3 不同提取方法番石榴多糖对肠炎果蝇肠壁通透性的影响

亮蓝作为一种可食用性色素, 果蝇食用后会浸染口器与消化道, 如图 3(a)所示。被 SDS 破坏肠壁通透性的果蝇食入后, 亮蓝会浸染果蝇的口器、消化道、腹腔、胸腔等部位<sup>[14]</sup>, 使得果蝇整体呈蓝色, 如图 3(b)所示。摄入不同方法所得的番石榴多糖后, 可以显著减轻果蝇被浸染程度, 如图 3(c)和图 3(d)所示。与 GP1 组相比, GP2 组吸光值要更接近空白组, 如图 4 所示, 说明 GP2 恢复肠炎果蝇肠壁通透性的效果更为显著, 因此, 选择 GP2 进行后续分离纯化实验。

### 3.4 番石榴多糖的分离纯化

#### 3.4.1 DEAE-52 纤维柱纯化

以超纯水和 0.3、0.9、2.0 mol/L NaCl 为洗脱液进行洗脱, 得到 4 个主要洗脱峰, 如图 5 所示。收集得率最高的两个峰分别命名为 GPA 与 GPB,

其得率分别为 8% 与 32%, 将得率最高的 GPB 通过 Sepharose CL-6B 凝胶柱进行进一步纯化。

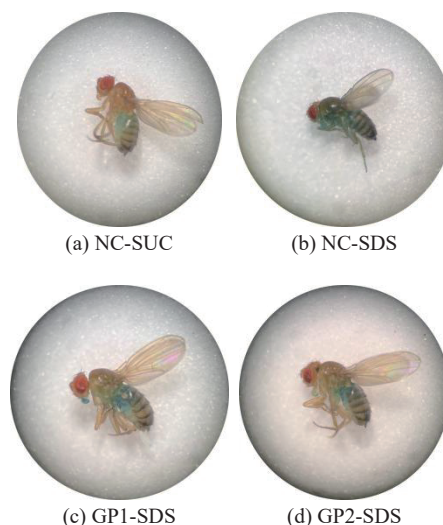


图 3 不同处理对果蝇肠壁通透性的影响实物图

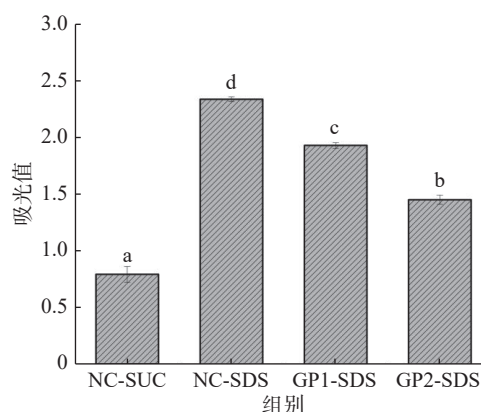


图 4 不同处理对肠炎果蝇肠壁通透性的影响对比图

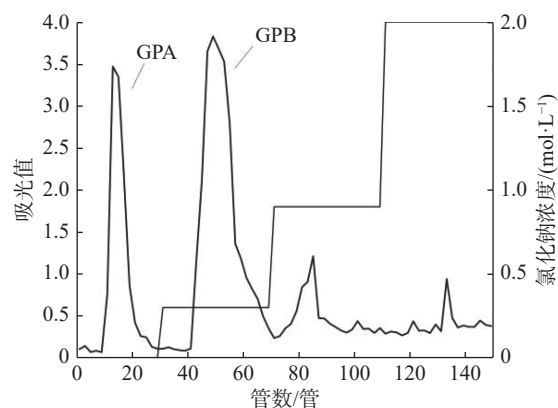


图 5 番石榴多糖的 DEAE-52 纤维柱洗脱曲线图

#### 3.4.2 Sepharose CL-6B 凝胶柱纯化

以超纯水为洗脱液, 收集吸光值最高的第 7、8、9 管并将其命名为 GPB-1, 如图 6 所示, 其得率约为 25%。

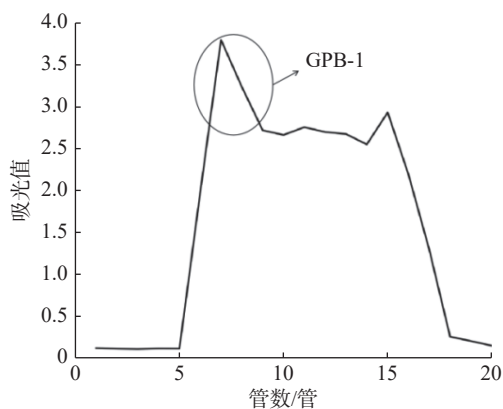


图 6 GP 的 Sephadex CL-6B 凝胶柱洗脱曲线图

### 3.5 番石榴多糖不同组分对肠炎果蝇存活率的影响

与 NC-SDS 模型组相比, GPA 与 GPB-1 干预组肠炎果蝇的存活曲线均呈现显著右移趋势, 如图 7 所示。进一步对比发现, GPB-1 在 0.60% 干预浓度下, 对肠炎果蝇的寿命挽救效果要更为显著, 具体体现为平均寿命、中位寿命以及最高寿命相较模型组 (NC-SDS) 分别延长了 50.0%、28.6% 和 38.9%, 如表 2 所示。

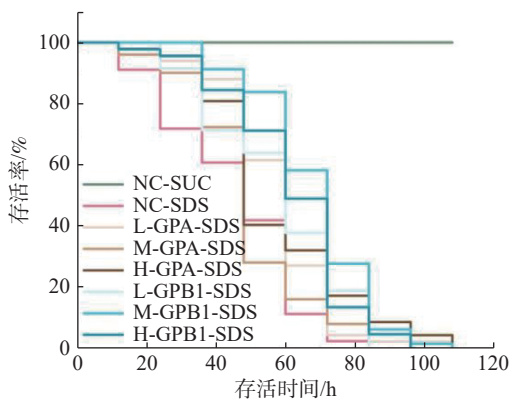


图 7 不同浓度的 GPA、GPB-1 对肠炎果蝇存活率的影响对比图

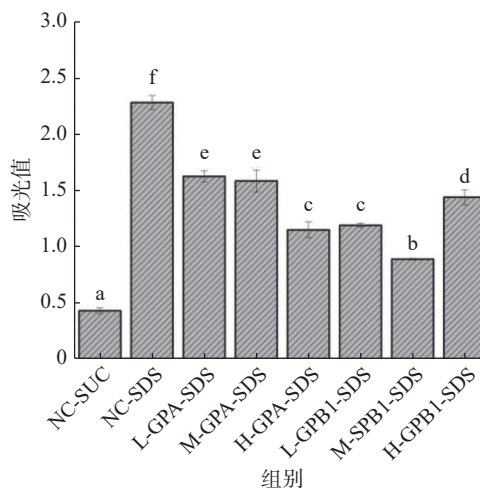
表 2 不同浓度的 GPA、GPB-1 对肠炎果蝇寿命的影响

| 组别         | 平均寿命/h        | 中位寿命/h     | 最高寿命/h        |
|------------|---------------|------------|---------------|
| NC-SDS     | 45.45±2.63    | 56.00±6.93 | 72.00±12.00   |
| L-GPA-SDS  | 56.97±9.40*   | 52.00±6.93 | 84.00±20.78   |
| M-GPA-SDS  | 49.22±3.64    | 48.00±0    | 80.00±6.93    |
| H-GPA-SDS  | 57.17±8.41*   | 52.00±6.93 | 96.00±12.00   |
| L-GPB1-SDS | 58.71±1.87**  | 60.00±0    | 92.00±6.93    |
| M-GPB1-SDS | 68.19±1.92*** | 72.00±0**  | 100.00±6.93** |
| H-GPB1-SDS | 61.87±3.95**  | 64.00±6.93 | 92.00±6.93    |

注: \*表示  $P < 0.05$ ; \*\*表示  $P < 0.01$ ; \*\*\*表示  $P < 0.001$  (显著性分析与模型组 NC-SDS 进行比较)

### 3.6 番石榴多糖不同组分对肠炎果蝇肠壁通透性的影响

相比模型组, 不同浓度的 GPA 与 GPB-1 处理均可显著减轻果蝇被浸染程度, 如图 8 所示。其中, GPB-1 干预浓度为 0.60% (M-GPB-1) 时, 吸光度最接近空白组, 表明该浓度恢复肠炎果蝇肠壁通透性效果最为明显。因此, 确定 0.60% 浓度的 GPB-1 作为后续试验的干预浓度, 并采用该浓度进一步探讨其对肠炎果蝇肠道长度以及氧化应激水平的影响。



注: 不同字母表示各组别之间存在显著性差异, 相同字母表示组别间没有显著性差异

图 8 不同浓度的 GPA、GPB-1 对果蝇肠壁通透性的影响对比图

### 3.7 番石榴多糖 GPB1 对肠炎果蝇抗氧化指标及肠道长度的影响

#### 3.7.1 番石榴多糖 GPB1 对肠炎果蝇抗氧化指标的影响

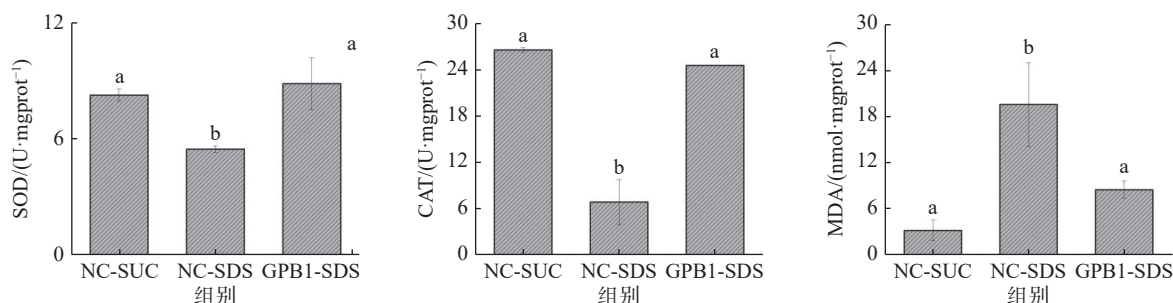
SDS 通过破坏果蝇肠道上皮屏障、引发炎症反应以及诱导氧化应激使果蝇体内丙二醛 (MDA) 等氧化应激产物含量上升。超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 作为关键抗氧化酶可以保护生物体免受氧化应激产物造成的损害<sup>[15-16]</sup>。测量果蝇体内 SOD、CAT 活性以及 MDA 有助于了解不同条件下果蝇体内氧化应激状态。

试验数据显示, 与模型组相比, GPB-1 处理显著提升了肠炎果蝇 SOD 与 CAT 活性至空白组水平, 如图 9(a) 和图 9(b) 所示。同时与模型组相比, GPB-1 干预后 MDA 含量从  $19.55 \pm 5.45$  nmol/mgprot 降低至  $8.47 \pm 1.11$  nmol/mgprot, 降低 56.7%, 如图 9(c) 所示。实验结果表明, GPB-1 具有强大的

抗氧化能力, 可以减轻氧化应激与脂质过氧化损伤, 从而保护果蝇肠道健康。

### 3.7.2 番石榴多糖 GPB-1 对肠炎果蝇肠道长度的影响

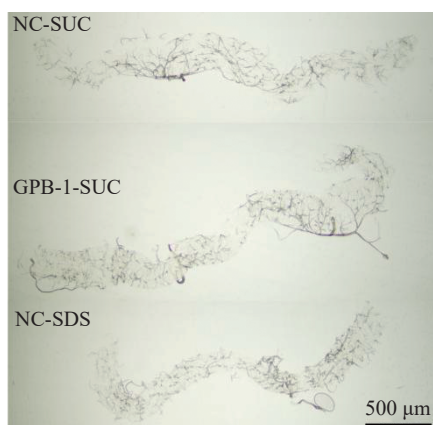
SDS 诱导的果蝇肠道损失可改变肠道长度,



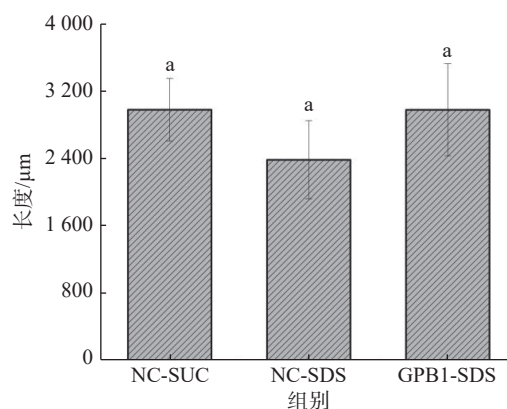
(a) GPB-1 对肠炎果蝇 SOD 活性的影响 (b) GPB-1 对肠炎果蝇肠道 CAT 活性的影响 (c) GPB-1 对肠炎果蝇 MDA 含量的影响

注: 不同字母表示各组别之间存在显著性差异, 相同字母表示组别间没有显著性差异

图9 GPB-1 对肠炎果蝇 SOD、CAT 活性以及 MDA 含量的影响对比图



(a) GPB-1 对肠炎果蝇肠道形态的影响



(b) GPB-1 对肠炎果蝇肠道长度活性的影响

注: 相同字母表示组别间没有显著性差异

图10 GPB-1 对肠炎果蝇肠道形态及肠道长度的影响对比图

## 4 结束语

本研究以果蝇为模式生物, 系统探究了番石榴多糖的提取、纯化及其生物活性评价。作为天然产物研究的经典模型, 果蝇具备繁殖周期短、遗传背景明确、与哺乳动物信号通路高度保守等优势。通过多学科交叉的实验设计, 构建了 SDS 诱导的果蝇肠炎模型作为教学载体, 系统评估了不同提取方法获得的番石榴多糖(GP2 及其纯化产物 GPB-1)对肠道炎症的改善作用, 并建立了一套完整的实践教学体系。本研究不仅有助于学生掌握果蝇的饲养与实验操作技能, 更能深入理解果蝇模型在天然产物研究中的应用价值, 以及多糖

如图 10(a) 所示。模型组肠道长度为  $2385.85 \pm 466.77$  mm, GPB-1 组肠道长度为  $2981.33 \pm 549.40$  mm, 增长 25.0%, 可以恢复果蝇肠道长度至空白组水平, 如图 10(b) 所示。因此, GPB-1 可改善因 SDS 诱导产生的肠道形态变化。

类物质的提取、纯化与功能评价技术体系。相较于传统研究模型, 果蝇实验体系具有三重优势: 首先, 其简化的实验流程显著提升研究效率; 其次, 有效规避高等动物实验的伦理限制; 最后, 在降低实验成本的同时保障操作安全性, 特别适用于高校实验教学。

实验结果表明, GP2 和 GPB-1 能显著延长肠炎果蝇寿命, 提高存活率, 并有效改善肠壁通透性。进一步的机制研究发现, 经 GPB-1 处理的肠炎果蝇表现出显著的抗氧化特性: SOD、CAT 活性恢复至正常水平, MDA 含量显著降低 56.7%, 同时肠道长度相比模型组增长 25.0%。这些发现不仅揭示了番石榴多糖在改善肠道炎症和促进肠道

健康方面的潜在应用价值, 更为其作为功能性食品成分或药物补充剂的开发提供了重要的实验依据。

### 参考文献

- [1] XIU M H, WANG Y X, YANG D, et al. Using *Drosophila melanogaster* as a suitable platform for drug discovery from natural products in inflammatory bowel disease[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 1072715.
- [2] YANG S P, LI X, XIU M H, et al. Flos puerariae ameliorates the intestinal inflammation of *Drosophila* via modulating the Nrf2/Keap1, JAK-STAT and Wnt signaling[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 893758.
- [3] SONG G L, CHEN F Y, CHEN S B, et al. Polysaccharides from *Premna microphylla* turcz ameliorate inflammation via the enhancement of intestinal resistance in host[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 276: 114208.
- [4] LYE S H, CHTARBANOVA S. *Drosophila* as a model to study brain innate immunity in health and disease[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(12): 3922.
- [5] LI X, YANG S P, WANG S W, et al. Regulation and mechanism of *Astragalus polysaccharide* on ameliorating aging in *Drosophila melanogaster*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 234: 123632.
- [6] 孙玉玉, 任子钰, 苏娟, 等. 植物多糖的提取及生物学功能研究进展[J]. *中国果菜*, 2025, 45(1): 31-37.
- [7] 殷军艺, 陈什康, 王君巧, 等. 从理论到实践: 天然产物来源多糖结构解析体系构建[J]. *中国食品学报*, 2025, 25(5): 452-464.
- [8] PAN Z G, LUO H L, HE F Q, et al. Guava polysaccharides attenuate high fat and STZ-induced hyperglycemia by regulating gut microbiota and arachidonic acid metabolism[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 276: 133725.
- [9] 李珊, 梁俭, 冯彬, 等. 番石榴多糖的提取工艺优化、纯化及其抗氧化活性测试[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(7): 68-73.
- [10] 罗春萍, 陆友利, 王星星. 苯酚-硫酸法快速测定多糖方法的优化[J]. *化工管理*, 2021(3): 90-91.
- [11] 姜惠萍, 刘万顺, 宋福来, 等. 改良考马斯亮蓝试剂法测定壳聚糖及其衍生物中蛋白质含量[J]. *现代食品*, 2022, 28(17): 173-178.
- [12] 王新茗, 马天宇, 徐丽华, 等. 低共熔溶剂提取天然产物的研究进展[J]. *食品与药品*, 2021, 23(2): 177-184.
- [13] HE J Z, LI X, YANG S P, et al. Protective effect of astragalus membranaceus and its bioactive compounds against the intestinal inflammation in *Drosophila*[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 1019594.
- [14] 瞿涛, 肖桂然. 黑豆皮提取物对果蝇结肠炎的保护作用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2024, 47(5): 685-689.
- [15] ZHU K, NI H, HAFEEZ E, et al. Effects of silibinin on delaying aging in *Drosophila melanogaster*[J]. *Antioxidants*, 2025, 14(2): 147.
- [16] DAI X J, ZHANG Q Y, ZHANG G C, et al. Protective effect of agar oligosaccharide on male *Drosophila melanogaster* suffering from oxidative stress via intestinal microflora activating the Keap1-Nrf2 signaling pathway[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120878.

编辑 葛晋