

阿胶蜂蜜复配物对小鼠模型抗氧化能力及肠道菌群的影响

李 聪^{1,2,3} 陆晓东^{4,5,6} 马雪莹^{1,2,3} 王 腾^{4,5,6} 解 晓^{1,2,3}
张建岭^{1,2,3} 王周平^{4,5,6}

(1. 东阿阿胶保健品有限公司, 山东 聊城 252200; 2. 聊城市功能性食品研究开发重点实验室, 山东 聊城 252200;
3. 营养健康消费品聊城市工程研究中心, 山东 聊城 252200; 4. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 5. 国家功能食品工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122; 6. 食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: [目的] 探讨阿胶蜂蜜复配物对小鼠抗氧化活性及肠道菌群的调节作用及变化特征。[方法] 将 70 只 SPF 级雄性 BALB/c 小鼠随机分为 7 组(每组 10 只), 分别为空白对照组、模型对照组、阿胶组(0.5 g/kg BW)、蜂蜜低剂量组(1.0 g/kg BW)、蜂蜜高剂量组(2.0 g/kg BW)、复配低剂量组(阿胶、蜂蜜剂量分别为 0.5, 1.0 g/kg BW)、复配高剂量组(阿胶、蜂蜜剂量分别为 0.5, 2.0 g/kg BW)。除空白组外, 其余组别均建立氧化应激模型, 持续干预 30 d 后检测相关指标。[结果] 复配高剂量组较阿胶组以及蜂蜜组显著降低了脂质过氧化产物(MDA)和蛋白质羰基(PCO)水平, 同时提升了超氧化物歧化酶(SOD)及还原型谷胱甘肽(GSH)水平($P < 0.05$), 证实复配物具有协同抗氧化效应, 且高剂量组效果最优。复配物通过抑制肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白介素-6(IL-6)以及白介素-1 β (IL-1 β)水平来减轻机体炎症反应。肠道内容物中微生物菌群基因组测序结果显示, 单独摄入阿胶或蜂蜜对于菌群的影响并不显著, 而摄入阿胶蜂蜜复配物可以改善微生态失调和失衡, 其中高剂量组的复配物有着更好的效果; 摄入低剂量和高剂量复配物的小鼠肠道微生物菌群中拟杆菌门相对丰度增加, 厚壁菌门相对丰度减少。[结论] 阿胶蜂蜜复配物通过其协同抗氧化活性, 有效增强了机体的自由基清除能力, 同时调节菌群平衡, 显著减轻氧化应激损伤, 有助于维持肠道微环境的稳态。

关键词: 阿胶; 蜂蜜; 复配物; 功效; 评价; 肠道菌群; 抗氧化

Effects of honey compounded with *Colla Corii Asini* powder on antioxidant capacity and intestinal flora of mouse model

LI Cong^{1,2,3} LU Xiaodong^{4,5,6} MA Xueying^{1,2,3} WANG Teng^{4,5,6} XIE Xiao^{1,2,3}
ZHANG Jianling^{1,2,3} WANG Zhouping^{4,5,6}

(1. Dong'e Ejiao Health Product Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252200, China; 2. Liaocheng Key Laboratory of Functional Food Research and Development, Liaocheng, Shandong 252200, China; 3. Liaocheng Engineering Research Center for Nutrition and Health Consumer Products, Liaocheng, Shandong 252200, China; 4. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 5. Engineering Research Center for Functional Food, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 6. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: [Objective] To explore the regulatory effects and changing characteristics of the compound of *Colla Corii Asini* powder and honey on the antioxidant activity and intestinal flora of mice. [Methods] Seventy male BALB/c mice of SPF (Specific Pathogen Free, SPF)

基金项目:国家自然科学基金项目(面上项目,重点项目,重大项目)(编号:32372423)

通信作者:王周平(1974—),男,江南大学教授,博士。E-mail:wangzp@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2025-08-08 **改回日期:**2025-12-28

引用格式:李聪, 陆晓东, 马雪莹, 等. 阿胶蜂蜜复配物对小鼠模型抗氧化能力及肠道菌群的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 120-129.

Citation: LI Cong, LU Xiaodong, MA Xueying, et al. Effects of honey compounded with *Colla Corii Asini* powder on antioxidant capacity and intestinal flora of mouse model[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 120-129.

grade are randomly divided into 7 groups (10 mice in each group), namely the blank control group, the model control group, the *Colla Corii Asini* group (0.5 g/kg BW), the low/high-dose honey groups (1.0/2.0 g/kg BW, respectively), and the low/high-dose compound groups (0.5+1.0/0.5+2.0 g/kg BW, respectively). Except for the blank group, oxidative stress models are established for the remaining groups. After 30 days of continuous intervention, relevant indicators are detected. [Results] Compared with the *Colla Corii Asini* group and the honey group, the high-dose compound group significantly reduces the levels of lipid peroxidation products (MDA) and protein carbonylation (PCO), while simultaneously increasing the levels of superoxide dismutase (SOD) and reduced glutathione (GSH) ($P < 0.05$), confirming that the compound has a synergistic antioxidant effect, and the high-dose group exhibits the best effect. The compound alleviates the body's inflammatory response by inhibiting the levels of tumor necrosis factor- α (TNF- α), interleukin-6 (IL-6), and interleukin-1 β (IL-1 β). The results of genomic sequencing of the microbial flora in the intestinal contents show that the effects of sole intake of *Colla Corii Asini* or honey on the flora were not significant, while the intake of the compound of *Colla Corii Asini* and honey could improve microecological disorders and imbalances, with the high-dose compound demonstrating a better effect. In the intestinal flora of mice that ingested the low-dose and high-dose compounds, there is an increase in the content of Bacteroidetes and a decrease in the content of Firmicutes. [Conclusion] The compound of *Colla Corii Asini* and honey effectively enhances the body's free radical scavenging ability through its synergistic antioxidant activity. Meanwhile, it regulates the balance of the flora, significantly reduces oxidative stress damage, and contributes to maintaining the homeostasis of the intestinal microenvironment.

Keywords: *Colla Corii Asini*; honey; compound; efficacy; evaluation; intestinal flora; antioxidation

随着环境压力与代谢负荷的持续增加,人体内氧化还原平衡系统面临显著挑战。临床数据^[1]显示,氧化应激所致的亚健康状态在当代社会较为常见,约68%的成年人存在持续性的抗氧化能力下降。抗氧化防御体系作为机体重要的保护机制,其失衡通常会引发一系列连锁反应:线粒体来源的活性氧(ROS)过量生成可破坏电子传递链完整性^[2],NADPH氧化酶系统异常激活将导致DNA氧化损伤^[3],而还原型谷胱甘肽(GSH)及超氧化物歧化酶(SOD)活力降低,则直接削弱细胞清除自由基的能力^[4]。系统性抗氧化能力不足可引起丙二醛(MDA)等脂质过氧化产物堆积^[5]、蛋白质羰基(PCO)水平升高及线粒体膜电位异常,进而形成氧化应激恶性循环^[6]。而当机体长期处于氧化还原稳态失调状态时,将引发系统性病理改变^[7]。临床研究^[8]表明,超过40%的慢性疾病患者存在GSH含量降低与硫氧还蛋白还原酶(TrxR)表达异常,这种持续性抗氧化防御缺陷会导致内分泌紊乱、免疫监视失效、组织损伤累积等。研究表明,天然食品成分可安全有效地提升机体抗氧化能力。例如,凌荣瑞^[9]揭示了堇叶碎米荠的抗氧化机制,证实其可显著缓解乙醇诱导的氧化应激;杨晓等^[10]开发了一种低聚肽—维生素C复合固体饮料,经动物试验验证,该固体饮料对乙醇致大鼠氧化损伤具有保护作用;陈娜^[11]开发了一种高F值寡肽复配枸杞葛根的解酒护肝产品,其能有效降低氧化应激水平并抑制炎症反应。鉴于氧化还原稳态需多维度协同调控的特性,靶向营养干预正逐步取代单一抗氧化剂补充策略,成为维持机体抗氧化防御体系平衡的重要途径。该策略通过多通路协同作用(如激活内源性抗氧化酶、调节细胞信号转导等),实现对氧化应激的综合调控^[12]。

阿胶(*Asini Corii Colla*)作为传统名贵中药及现代功能食品的典范,其潜在成分对于抗氧化影响调控逐渐成

为研究热点^[13]。阿胶为马科动物驴(*Equus asinus L.*)皮经煎煮浓缩制成的固体胶^[14]。有研究^[15]表明,阿胶可以显著地缓解氧化应激的功效,特别是在特异性清除自由基和提升SOD活力以及GSH含量方面。阿胶含胶原蛋白水解肽(相对分子质量1 000~3 000)、驴源血红素铁、硫酸皮肤素多糖等活性组分^[16],其中驴特异性胶原三螺旋结构经酶解产生的阿胶低聚肽(EJOPs),被证实具有显著的自由基清除能力^[17]。Xu等^[18]使用碱性蛋白酶制备高抗氧化阿胶多肽,发现相对分子质量<3 000的多肽对羟自由基的清除能力更强。杜博玮等^[19]将阿胶多肽与银杏叶提取物复配,获得了更强的抗氧化活性,并推测出阿胶多肽的二级结构与其高抗氧化性能有着关联性。

蜂蜜作为一种天然的抗氧化剂,其富含的多酚类化合物具有显著的抗氧化功效^[20]。多酚作为一类天然氧化抑制剂可通过螯合过渡金属离子,阻断脂质过氧化链式反应^[21~22]。蜂蜜中黄酮类物质(如槲皮素、山柰酚)及酚酸类化合物具有强自由基清除能力,可有效中和超氧阴离子和羟自由基,降低脂质过氧化水平^[23]。蜂蜜的抗氧化作用与抗炎、免疫调节功能存在协同效应。Fauzi等^[24]研究发现,马来西亚多朗蜂蜜有着明显的抗氧化与抗炎协同作用。张金萍^[25]研究发现,山乌柏蜜可显著调节酒精诱导的肠道菌群失衡,并提升短链脂肪酸(SCFAs)含量。其通过重塑肠道微生态(促进产SCFAs菌群增殖),激活肠道—肝脏抗氧化通路,从而有效缓解系统性氧化应激。

单一成分干预的效果是有限的,其作用靶点单一、生物利用度低,且易受氧化应激微环境影响失活。复配是指将两种或两种以上的功能成分,按照一定的科学配方进行混合,以达到某种特定的使用效果,其往往能达到协同增效的作用^[26]。Tlak等^[27]提出了浆果多酚可以显著提

高蜂蜜的抗氧化活性，并通过组合指数评估了浆果多酚与蜂蜜内源性活性成分(如酚酸、黄酮)之间的相互作用，揭示二者存在剂量依赖性协同效应。宋露露等^[28]将山楂与阿胶进行复配组合，制备了一种具备良好的自由基清除能力功能的软糖。研究拟以阿胶和蜂蜜为抗氧化功能成分原料，基于阿胶多肽与蜂蜜多酚的抗氧化互补特性，设计 1:2 和 1:4 梯度复配物，利用乙醇诱导的小鼠氧化应激模型，通过检测氧化损伤标志物、炎症因子水平及肠道菌群组成与功能，系统解析复配物的协同抗氧化机制，旨在为阿胶和蜂蜜复配物的开发和利用提供新路径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

阿胶速溶粉：东阿阿胶保健品有限公司；
蜂蜜：麦卢卡花蜂蜜，瑞琪奥兰(上海)食品科技有限公司；
MDA 测试盒、SOD 测定试剂盒、GSH 测定试剂盒、BCA 法蛋白定量测试盒、PCO 含量测试盒：南京建成生物工程有限公司；
TNF- α 、IL-6、IL-1 β 测定试剂盒：生工生物工程(上海)有限公司；
无水乙醇、乙酸乙酯、冰醋酸：分析纯，国药集团上海有限公司；
全自动生化分析仪：EXC400 型，中元汇吉生物技术股份有限公司；
电子天平：ME3002E 型，梅特勒—托利多集团；
酶标仪：Thermo 1510 型，赛默飞世尔科技公司；
微生物培养箱：IMH100 型，赛默飞世尔科技公司；
水浴锅：HSS-11-1 型，常州诺基仪器有限公司；
高效液相色谱仪：e2695 型，美国 Waters 公司；
高效气相色谱：Agilent 7890a 型，美国 Agilent 公司；
色谱柱：Hypersil AA-ODS 柱 (200 mm×2.1 mm×5 μ m)、DB-FFAP 毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μ m)，美国 Agilent 公司。

1.2 复配方法

取 20 g 阿胶粉倒入 40 g 或 80 g 蜂蜜中，加入 500 mL 温水(约 40 °C)并缓慢搅拌直至溶解透明。分别取上述液体于 60 °C 下减压浓缩(真空度 0.08 MPa)至原体积的 1/4(耗时约 120 min)。预冷冻(-80 °C)后进行冷冻干燥(-40 °C, 50 Pa)，得到不同复配比(1:2, 1:4)的阿胶蜂蜜复配物，产物于低温(4 °C)下贮藏备用。复配比例参考了多酚与蛋白/肽类物质在协同抗氧化体系中的常见配比范围^[27]。

1.3 常见指标检测

(1) 水分含量：按 GB 5009.3—2016 中的直接干燥法执行。
(2) 蛋白质含量：按 GB 5009.5—2016 中的凯氏定氮

法执行。

- (3) 游离氨基酸含量：按 GB 5009.124—2016 执行。
- (4) 脂类和脂肪酸含量：按 GB 5009.168—2016 执行。
- (5) 麦卢卡花蜂蜜指标：由华测检测认证集团股份有限公司测定。

1.4 试验动物

雄性 BALB/c 小鼠：SPF 级，18~22 g，斯贝福(苏州)生物技术有限公司。所有试验模块均设空白对照组、模型对照组、阿胶组(0.5 g/kg BW)、蜂蜜低剂量组(1.0 g/kg BW)、蜂蜜高剂量组(2.0 g/kg BW)、复配低剂量组(阿胶、蜂蜜剂量分别为 0.5, 1.0 g/kg BW)、复配高剂量组(阿胶、蜂蜜剂量分别为 0.5, 2.0 g/kg BW)7 个试验组，以上剂量均为每日摄入量，分别标记为 D、M、A、FD、FG、FAD、FAG。空白对照组和模型对照组喂食普通饲料(包含玉米、豆粕、进口鱼粉、维生素、微量元素、氨基酸)，通过拌饲的方式给予小鼠喂食 30 d。

1.5 试验方法及生物指标测定

采用乙醇诱导氧化损伤模型开展动物试验。SPF 级健康雄性 BALB/c 小鼠于温度(22±1) °C，湿度(50±10)%，12 h 明暗循环适应性饲养 5 d 后，采用分层随机法按体重分为 7 组，每组 10 只动物，分别喂食饲料 30 d。各组连续喂食饲料 30 d 后，除空白对照组外，其余组别经 16 h 禁食后按 12 mL/kg·BW 剂量给予 50% 乙醇溶液诱导急性氧化应激模型。造模 6 h 后，采用 CO₂ 麻醉处死动物，无菌操作下摘取肝脏组织、回肠组织并置于无菌离心管中于-80 °C 下保存，收集回盲部肠道内容物。肠道内容物采用液氮速冻后送检 16S rRNA 基因测序分析肠道菌群结构。

1.5.1 肝脏指标测定 肝脏置于 4 °C 冰箱过夜解冻后，匀浆取样。按试剂盒说明书配制好相应试剂，测定小鼠肝脏组织中 GSH 质量分数、SOD 质量分数、MDA 质量摩尔浓度及 PCO 质量分数。

1.5.2 回肠指标测定 回肠置于 4 °C 冰箱过夜解冻后，匀浆取样。按试剂盒说明书配制好相应试剂，测定小鼠回肠组织中 TNF- α 、IL-6、IL-1 β 质量浓度。

1.5.3 小鼠粪便短链脂肪酸测定 取 200 mg 粪便，加入 1 mL 含 50 μ mol/L 2-乙基丁酸(内标)的 PBS(pH 7.4)，涡旋 5 min, 4 °C, 12 000×g 离心 10 min。取 800 μ L 上清液，加 100 μ L 浓盐酸酸化，1 mL 乙醚萃取，静置分层后取有机相过 0.22 μ m 滤膜。GC 分析条件：DB-FFAP 柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μ m)，载气流量 1.0 mL/min，分流比 10:1，进样量 1 μ L。外标法定量乙酸、丙酸和丁酸。

1.5.4 16S rRNA 测序 每组选取 6 只小鼠，收集其肠道内容物样本送至武汉迈特维尔生物科技有限公司进行 16S rRNA 扩增子测序。

1.6 数据处理

试验数据结果使用 SPSS 软件进行统计分析。对数据进行方差齐性检验,满足方差齐性要求的数据,采用单因素方差分析进行统计处理;对于非正态分布或方差不齐的数据,进行适当的变量转换,使其满足正态分布和方差齐性的要求;若变量转换后仍未达到正态或方差齐的目的,改用秩和检验进行统计。

2 结果与分析

2.1 阿胶速溶粉常见成分组成

采用东阿阿胶保健品有限公司的阿胶速溶粉进行测定,颜色呈浅棕色粉状,具有胶香味、味微甜、无特殊异味,无肉眼可见杂质。经测定阿胶速溶粉中不同物质的成分含量见表1。

表 1 阿胶速溶粉常见成分含量

Table 1 Common component content of instant *Colla Corii Asini* powder

成分	质量分数/%
蛋白质及其水解产物	80
糖类物质	10
脂类及脂肪酸	6
其他活性成分	4

经过工业加工所得到的阿胶速溶粉通过蒸煮工艺以及高温处理,使得本身所含有的蛋白质被部分水解,形成不同相对分子质量的多肽,通过高效液相色谱法测定(GB/T 22729—2008)蛋白质中多肽的相对分子质量,峰面积百分比见表2。阿胶速溶粉中的蛋白质可以分为3个板块:多肽高相对分子质量区域、多肽中等相对分子质量区域以及多肽低相对分子质量区域。其中多肽高相对分子质量区域包含了完整或较大片段胶原蛋白以及血清蛋白等,主要含 $\alpha 1/\alpha 2$ 胶原链及其多聚体,其三股螺旋结构可有效负载蜂蜜多酚,通过疏水腔室保护酚羟基免遭氧化失活;多肽中等相对分子质量区域以胶原蛋白降解肽(如Gly-Pro-Hyp三肽单元)和阿胶糖肽为主,其暴露的酪氨酸残基能与多酚形成供电子—受电子对,协同清除羟

表 2 阿胶速溶粉中蛋白质及水解产物的多肽相对分子质量占比

Table 2 Proportions of polypeptide molecular weights of proteins and their hydrolysates in instant *Colla Corii Asini* powder

蛋白质及水解产物	峰面积百分比/%
多肽高相对分子质量区域(>6万)	35.74
多肽中等相对分子质量区域(1万~6万)	43.95
多肽低相对分子质量区域(<1万)	20.31

自由基;多肽低相对分子质量区域包含了小分子肽段以及不同种类的氨基酸,富含Pro-Gly、Glu-Lys等二肽及游离氨基酸,其氨基与蜂蜜多酚的邻苯二酚基团通过氢键网络形成稳定复合物^[17]。

2.2 蜂蜜常见指标

麦卢卡花蜂蜜呈透明的棕黄色,具有果香味,味甜,较黏稠。蜂蜜中糖类质量分数占比约为80.053%,其余活性物质中又以氨基酸和多酚类物质为主,由于多酚类和黄酮类物质能有效地实现抗氧化的调控^[20]。通过高效液相色谱法对麦卢卡花蜂蜜进行了对应活性成分的测定,结果见表3。

表 3 蜂蜜常见成分含量

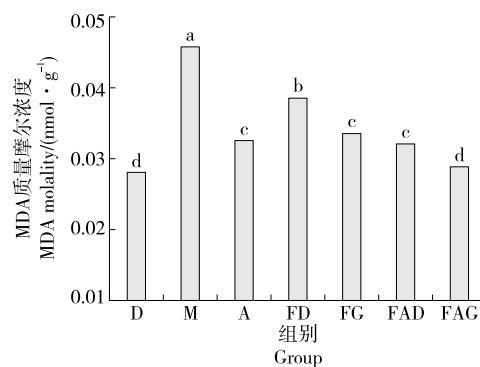
Table 3 Common component content of honey

成分	质量分数/%
糖类(果糖、葡萄糖)	80.053
水分	16.947
多酚类物质(槲皮素、山柰酚)	0.056
甲基乙二醛(MGO)	0.040
独麦素	0.005
其他活性成分	2.899

麦卢卡花蜂蜜的多酚类物质(如总酚、总黄酮)中特有的槲皮素、山柰酚等黄酮类化合物可清除自由基、螯合游离Fe²⁺并激活Nrf2/ARE抗氧化通路,三重机制可增强复配物的抗氧化效能^[29]。甲基乙二醛(MGO)和独麦素作为麦卢卡蜂蜜中的一种标志性化合物,不仅可以用于鉴别真伪,而且也是作为UMF评级的重要参考标准。

2.3 受试物对肝脏中MDA质量摩尔浓度的影响

由图1可知,模型对照组较空白对照组MDA质量摩尔浓度显著升高($P<0.01$),证实抗氧化损伤模型构建成功。干预后各试验组MDA质量摩尔浓度较模型对照组



字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

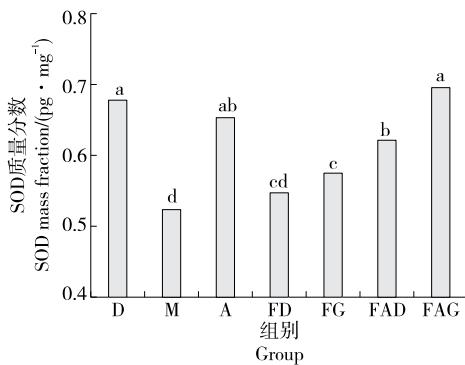
图 1 受试物对小鼠肝脏中MDA质量摩尔浓度的影响

Figure 1 Effects of the test substance on the molality of MDA in the liver of mice

均显著降低($P<0.05$),且随蜂蜜质量分数增加,复配物降低MDA质量摩尔浓度的效应呈明显剂量依赖性。该效应主要依赖蜂蜜中的多酚类物质(如槲皮素、山柰酚),通过激活Nrf2通路抑制脂质过氧化。值得注意的是,阿胶组与阿胶蜂蜜复配高剂量组间呈现统计学差异($P<0.01$),其中阿胶—蜂蜜协同干预策略显示出最强的抗氧化效能。阿胶组与蜂蜜组及复配应用相比于模型对照组均表现出显著的抗氧化效应,阿胶多肽在氧化应激初期能快速中和自由基,而蜂蜜多酚能持续抑制后续过氧化进程。通过剂量依赖方式抑制脂质过氧化进程,且二者协同作用可产生更强的抗氧化效果。

2.4 受试物对肝脏中SOD质量分数的影响

由图2可知,模型对照组SOD质量分数较空白对照组显著降低($P<0.01$),说明抗氧化损伤模型有效。干预后各试验组SOD质量分数均较模型组显著提升($P<0.05$),其中蜂蜜低、高剂量组间未呈现出显著性差异($P>0.05$),而阿胶单体干预组则呈现显著上升趋势($P<0.01$)。而对于复配组来说,复配高剂量组相比于阿胶组有着更明显的提升,表明阿胶、蜂蜜以及阿胶+蜂蜜复配有升高体内SOD质量分数的作用。复配之后随着蜂蜜质量分数的升高,复配物中总多酚增多,因此提升效果也更加显著。阿胶与蜂蜜可通过独立或协同作用正向调控SOD表达,蜂蜜质量分数与抗氧化效应呈正相关。



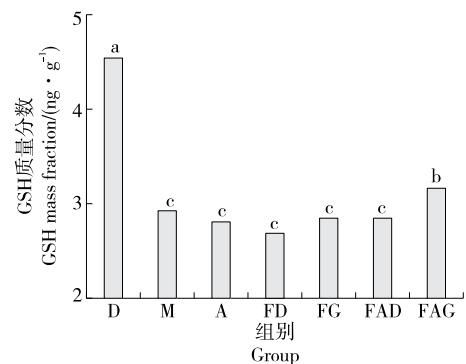
字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

图2 受试物对小鼠肝脏中SOD质量分数的影响

Figure 2 Effects of the test substance on the mass fraction of SOD in the liver of mice

2.5 受试物对肝脏中GSH质量分数的影响

由图3可知,模型对照组GSH质量分数较空白对照组显著降低($P<0.01$),符合造模成功判定标准。通过对比组间差异性,阿胶组、蜂蜜低、高剂量组及蜂蜜阿胶复配低剂量组的GSH质量分数均未呈现出统计学差异($P>0.05$),但模型对照组与蜂蜜阿胶高剂量组对比有显著性差异($P<0.05$)。当蜂蜜的质量分数 $<1.5\text{ g/kg}$ 时,GSH质量分数无显著变化;而质量分数 $\geq 1.5\text{ g/kg}$ 时,可显著激活



字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

图3 受试物对小鼠肝脏中GSH质量分数的影响

Figure 3 Effects of the test substance on the mass fraction of GSH in the liver of mice

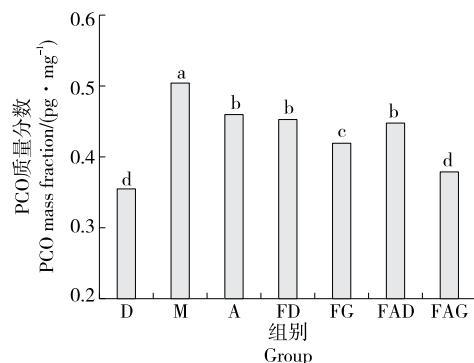
γ -谷氨酰半胱氨酸连接酶(γ -GCL)的活性,并与阿胶多肽协同提升抗氧化效能^[30]。在复配干预模式下,蜂蜜质量分数与GSH合成效率呈正相关,提示二者存在基于底物互补的协同增效机制。

2.6 受试物对肝脏中PCO质量分数的影响

由图4可知,模型对照组PCO质量分数较空白对照组显著升高($P<0.01$),符合蛋白质氧化损伤模型建立标准。相比模型组,蜂蜜高剂量组与复配高剂量组的PCO质量分数显著降低($P<0.05$),而其他干预组(蜂蜜低剂量、阿胶组以及蜂蜜阿胶复配低剂量组)与模型组相比差异不显著($P>0.05$)。表明蜂蜜质量分数维持在 2.0 g/kg 时可通过构象稳定性调节,有效抑制蛋白质羰基加合物的形成,而且蜂蜜与阿胶复配后呈现出剂量依赖性协同保护效应。

2.7 受试物对回肠中炎症因子质量浓度的影响

乙醇肝损伤模型中,肠道炎症因子的增加是连接“肠道屏障破坏—内毒素移位—肝脏炎症”的关键环节^[31]。



字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

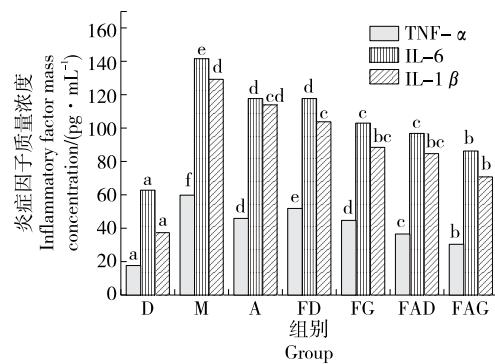
图4 受试物对小鼠肝脏中PCO质量分数的影响

Figure 4 Effects of the test substance on the mass fraction of PCO in the liver of mice

由图5可知,模型对照组的炎症因子(如TNF- α 、IL-6、IL-1 β 等)质量浓度较空白对照组均显著升高($P<0.01$),提示乙醇通过抑制紧密连接蛋白ZO-1表达破坏肠道屏障,进而加剧系统性炎症^[31]。与模型组相比,复配高剂量组的炎症因子质量浓度显著降低($P<0.01$),其他干预组之间的炎症因子质量浓度无显著差异($P>0.05$),但均较模型组有不同程度的降低($P<0.05$)。值得注意的是,阿胶多肽中的Gly-Pro-Hyp三肽单元与蜂蜜多酚的槲皮素已被证实可通过激活AMPK/mTOR通路促进肠上皮细胞迁移^[32],而炎症因子的减少通常伴随闭合蛋白表达上调^[33],可合理推测复配物通过“多肽—多酚—菌群代谢”协同网络间接增强肠道屏障完整性。上述结果表明,复配配方中的小分子多肽和多酚类化合物均具有肠道炎症因子抑制作用^[34],而复配高剂量组的抑制效果更显著,体现了复配后的协同增效优势。

2.8 受试物对小鼠肠道菌群结构的影响

2.8.1 α 多样性指数组间差异分析 由图6可知,与模型组相比,单阿胶或蜂蜜组无显著变化,而蜂蜜阿胶复配物呈现剂量依赖性的 α 多样性指数变化:复配高剂量组在ace、chao1及observed 3项丰度指标中均显示统计学显著下降($P<0.05$),分别为19%,23%,9%。提示该复配物在维持肠道菌群物种丰度的同时,通过优化菌群结构实现多样性稳态,同时相对偏差的缩短证明了其均匀度的提



字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

图5 受试物对小鼠回肠中炎症因子质量浓度的影响

Figure 5 Effects of the test substance on the mass concentration of inflammatory factors in the ileum of mice

升,从而形成稳定的优势菌群比例;而shannon多样性指数组间差异未达统计学显著性($P>0.05$),反映各试验组间菌群物种分布的相似性特征。上述发现证实,阿胶蜂蜜复配物通过调节肠道微生物 α 多样性指标,显著增强菌群生态系统的结构稳定性,其作用机制可能与阿胶多肽促进有益菌增殖、蜂蜜多酚抑制潜在致病菌并改善肠道微环境,进而调控特定菌属的相对丰度密切关联。

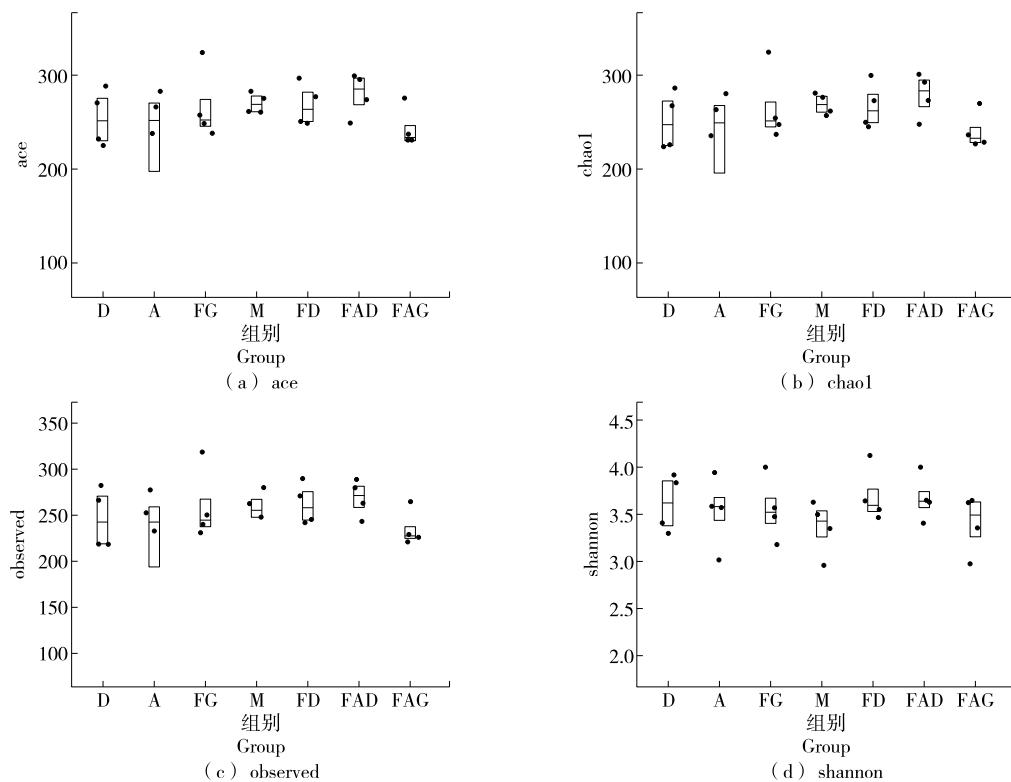


图6 α 多样性指数图

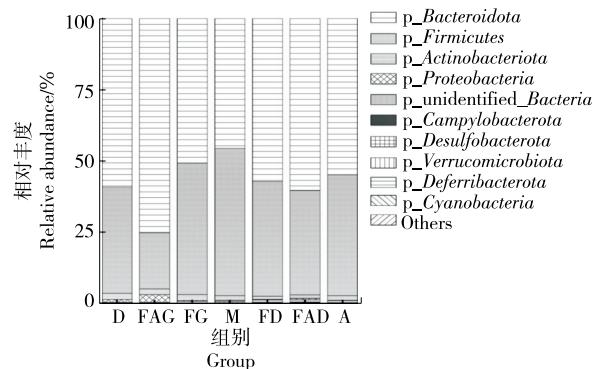
Figure 6 Alpha diversity indexes

2.8.2 各组菌群数量及其丰度差异 基于门分类水平的物种组成分析显示,12个主要菌门中包括未注释菌群(标注为 unidentified)及低丰度菌群(归类为 other)。由图 7(a)可知,优势菌群(相对丰度>1%)依次为拟杆菌门(*Bacteroidota*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)和放线菌门(*Actinobacteriota*)。乙醇代谢产生的 ROS 和乙醛可直接抑制肠道有益菌的生长繁殖,同时破坏肠道上皮细胞紧密连接,导致肠道屏障通透性增加^[35]。模型组拟杆菌门相对丰度(45.2%)均低于空白组(60.4%)和阿胶蜂蜜复配高剂量组(75.1%),拟杆菌门是肠道短链脂肪酸(SCFAs,如丁酸)的主要生产者,其减少会导致 SCFAs 生成减少,削弱肠道抗氧化能力(如血清 MDA 水平升高)和黏膜屏障功能^[35]。而厚壁菌门与放线菌门的异常增殖,证实造模过程中成功诱导了肠道菌群紊乱特征。相比于模型对照组,阿胶组与蜂蜜组对于菌群的分配比例影响较小,且不同剂量的蜂蜜对于丰度的干预并不明显。阿胶蜂蜜复配物的加入引起了肠道菌群的分布变化,其中阿胶多肽可能通过促进有益菌的增殖,蜂蜜多酚则有助于抑制条件致病菌并改善氧化微环境,二者协同调节菌群结构。随着阿胶蜂蜜复配物剂量的增加,拟杆菌门的相对丰度逐渐增加(低剂量 62.6% 至高剂量 75.1%, $P<0.05$),厚壁

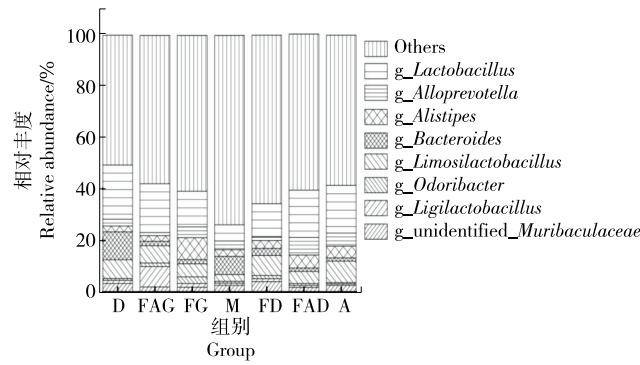
菌门的相对丰度逐渐减少(低剂量 34.4% 至高剂量 20.8%, $P<0.05$)。该调控梯度与宿主代谢指标呈显著负相关,提示复配物可能通过重塑核心菌门比例优化肠道代谢稳态,其作用机制与宿主—微生物共代谢调控网络存在剂量响应关联。

阿胶蜂蜜复配物高剂量组显著提高了拟杆菌门的相对丰度(图 7(b)),而该菌门是短链脂肪酸(SCFAs),尤其是丁酸的关键生产者。进一步检测证实,阿胶蜂蜜复配高剂量组小鼠肠道中丁酸水平显著上升($P<0.05$),相较模型对照组提升了约 90%。这一变化与肠道炎症因子(如 TNF- α 、IL-6)的下调及谷胱甘肽(GSH)水平的上升呈显著关联。提示复配物可能通过富集产 SCFA 菌群,增加丁酸生成,进而抑制 NF- κ B 通路激活,增加 GSH 的合成,从而减轻肠道炎症反应,增强抗氧化防御,最终缓解系统性氧化应激^[36]。

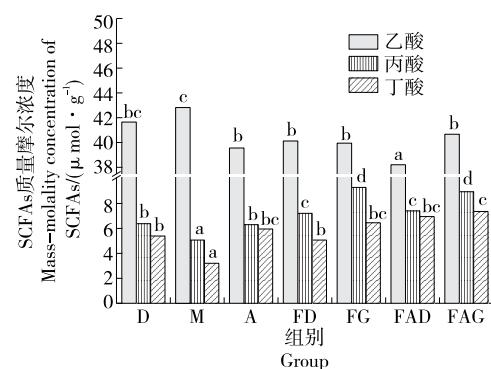
基于属分类水平的物种组成分析显示,9个主要菌门中包括未注释菌群(标注为 unidentified)及低丰度菌群(归类为 other)。由图 7(c)可知,优势菌群(相对丰度>1%)依次为乳杆菌属(*Lactobacillus*)、普雷沃氏菌属(*Alloprevotella*)、另枝菌属(*Alistipes*)、拟杆菌属(*Bacteroides*)、罗伊氏黏液乳杆菌属



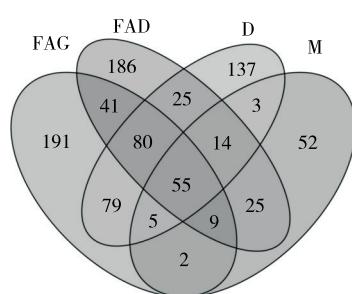
(a) 门水平上的物种相对丰度堆叠条形图



(c) 属水平上的物种相对丰度堆叠条形图



(b) 阿胶与蜂蜜及其复配物对小鼠SCFAs的影响(n=10)



(d) 基于OTU的韦恩图

图 7 微生物菌群数量及丰度差异分析

Figure 7 Analysis of the differences in the quantity and abundance of microbial flora

(*Limosilactobacillus*)、内脏奥德氏杆菌属(*Odoribacter*)和乳酸杆菌属(*Ligilactobacillus*)。阿胶蜂蜜复配高剂量组乳杆菌属(*Lactobacillus*)相对丰度(14.9%)显著高于模型对照组(6.2%)。该菌属通过双重通路增强抗氧化能力:分泌SOD等酶直接清除自由基^[37];代谢产生SCFAs激活Keap1-Nrf2通路,促进内源性抗氧化酶合成^[38]。阿胶组与复配物组乳杆菌属丰度显著高于空白对照组,提示阿胶多肽可能通过促进乳杆菌定植,增加乳酸生成以增强自由基清除能力,同时提升SCFAs产量激活Nrf2通路,形成协同抗氧化效应。

为了进一步探究阿胶蜂蜜复配物对微生物群落结构的影响,单独对空白对照组、模型对照组以及两个复配剂量组进行了关于菌群数量的对应分析。由图7(d)可知,4组样本共享核心OTU数目为55个,其中空白对照组、模型对照组、低剂量组及高剂量组中呈现特异性OTU分别为137,52,186,191个。生物信息学分析表明,OTU数量与菌群 α 多样性指数呈显著正相关^[36]。试验中,阿胶蜂蜜高剂量组OTU数目最多,饲喂低、高剂量阿胶蜂蜜复配物后,小鼠肠道菌群丰度和多样性有增强的趋势,提示阿胶多肽和蜂蜜多酚可能协同改善菌群生长微环境,促进微生物群落结构趋于稳定,该结果与菌群丰度堆叠图相对应。

2.8.3 LEfSe分析 为了进一步对比不同的复配剂量对肠道微生物菌群的影响,基于LEfSe算法对肠道菌群差异特征进行解析,结果如图8(a)所示。LEfSe分析图中4个OTU作为模型组的特征生物标志物,12个OTU特异性驱动高剂量组的菌群结构重塑。差异菌属的功能关联基于KEGG通路注释,其中*Lactobacillus*(鼠乳杆菌):产短链脂肪酸(如丁酸),增强肠道屏障并抑制炎症;*Ligilactobacillus*(唾液乳杆菌):免疫调节、代谢调控、肠道屏障保护及菌群稳态维持;*Lactobacillaceae*(乳酸杆菌科):抑制炎症通路(TLR2通路);*Lactobactillales*(乳杆菌目):促进抗炎因子IL-10分泌,抑制TNF- α 等促炎因子;*Bacilli*(芽孢杆菌纲):肠道屏障强化;*Firmicutes*(厚壁菌门):产短链脂肪酸,维持肠道稳态。鼠李糖乳杆菌属与g-链球菌属在蜂蜜阿胶复配低剂量组中表现出显著较高的丰度,而*Marinifilaceae*、*Odoribacter*等会影响炎症因子的菌群在对照中表现出显著更高的丰度。同时从图8(b)可以看出,蜂蜜阿胶复配高剂量组中乳杆菌属、乳酸杆菌属、芽孢杆菌属、厚壁菌属、鼠李糖乳杆菌属、g-链球菌属等显著富集,与蜂蜜阿胶复配低剂量组的组成相对应,提示复配物通过调控关键功能菌群的生态位竞争,并可能借助阿胶多肽与蜂蜜多酚的协同作用改善微生物生长环境,从而促进肠道微环境稳态重建。

3 结论

该研究验证了阿胶蜂蜜复配物所具有的抗氧化功

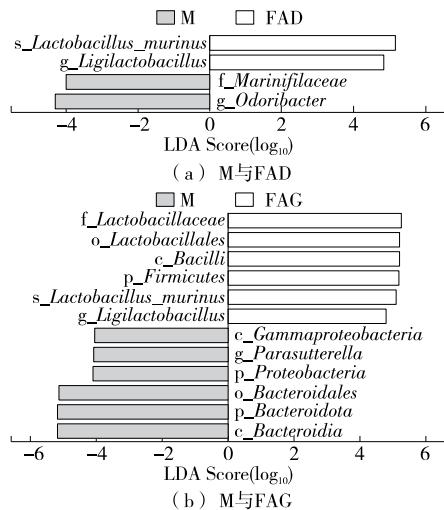


Figure 8 LEfSe analysis

Figure 8 LEfSe analysis

效。在动物试验中,通过对连续给予阿胶速溶粉及其蜂蜜复配物30 d后的小鼠测定脂质过氧化产物、超氧化物歧化酶、还原型谷胱甘肽与蛋白质羧基的含量,以及相应的炎症因子水平(肿瘤坏死因子- α 、白介素-6及白介素-1 β)。结果表明:相比空白对照组,模型对照组的脂质过氧化产物和蛋白质羧基含量显著升高,超氧化物歧化酶和还原型谷胱甘肽含量显著降低,模型成立。而与模型对照组相比,蜂蜜以及阿胶+蜂蜜复配物的脂质过氧化产物和蛋白质羧基含量显著降低,超氧化物歧化酶与还原型谷胱甘肽含量显著升高,炎症因子水平相较于模型组均显著降低。这表明阿胶蜂蜜复配物对动物的抗氧化指标产生了显著影响,同时有效降低了炎症因子水平,对于其机制上的探讨,则需要更进一步的研究挖掘。

通过乙醇造模引起机体内氧化应激的加剧,降低其肠道微生物的多样性,摄入蜂蜜阿胶复配物可以有效改善小鼠的肠道菌群微生态,从而改变肠道菌群的分布状态。具体表现为拟杆菌门的比例增加,厚壁菌门和放线菌门的比例减少,增加了抗氧化酶类物质的合成,肠道菌群多样性的丰度增加,减少了存在隐患的危害物质,并减少了由于氧化应激引起的炎症发生。此外,阿胶蜂蜜复配物高剂量组的菌群分布明显优于低剂量组,显著丰富了肠道菌群的多样性。

该研究系统地分析了阿胶蜂蜜复配物在抗氧化、缓解氧化应激方面的作用。在清除自由基方面,复配物相比于单一组分,通过稳态环境恢复有着更强的清除脂质过氧化物的能力,同时复配高剂量组相比于复配低剂量组通过“成分—菌群”互作有着更强的抗氧化物酶活性,长期服用可以提升小鼠体内抗氧化物活性、机体生物抗应激能力以及各类抗氧化物质的生成,最终实现“阿胶多肽—蜂蜜多酚—菌群代谢—稳态环境”的整体抗氧化的效果。

参考文献

- [1] WANG Z X, WANG Q Q, TANG F Y, et al. Composite dietary antioxidant index and obesity among U.S. adults in NHANES 2007—2018[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 28102.
- [2] PARK J, TANG H, ZHANG P. Deciphering the antioxidant capacity of common vitamins against specific reactive oxygen species by nuclear magnetic resonance[J]. *Food Chemistry*, 2025, 475: 143184.
- [3] ZHANG Q Q, SUN Z, SUN W B, et al. Engineering a synergistic antioxidant inhibition nanoplatform to enhance oxidative damage in tumor treatment[J]. *Acta Biomaterialia*, 2023, 158: 625-636.
- [4] MZID M, BADRAOUI R, BEN KHEDIR S, et al. Protective effect of ethanolic extract of *Urtica urens* L. against the toxicity of imidacloprid on bone remodeling in rats and antioxidant activities[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2017, 91: 1 022-1 041.
- [5] ZHAO L L, SUN J L, LIANG J, et al. Enhancing lipid metabolism and inducing antioxidant and immune responses to adapt to acute hypoxic stress in *Schizothorax prenanti*[J]. *Aquaculture*, 2020, 519: 734933.
- [6] CHEN G P, WANG Y Y, LIU X B, et al. Enhancing the effects of curcumin on oxidative stress injury in brain vascular endothelial cells using lactoferrin peptide nano-micelles: antioxidant activity and mechanism[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(1): 372-381.
- [7] POYATOS P, GRATACOS M, SAMUEL K, et al. Oxidative stress and antioxidant therapy in pulmonary hypertension[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(5): 1 006.
- [8] LU S Y, LIU M L, LIU H, et al. Gestational exposure to bisphenol AF causes endocrine disorder of corpus luteum by altering ovarian SIRT-1/Nrf2/NF- κ B expressions and macrophage proangiogenic function in mice[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2024, 220: 115954.
- [9] 凌荣瑞. 葱叶碎米荠富硒多肽对乙醇诱导肝细胞损伤的保护作用[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 8-12.
- LING R R. Protective effect of selenium-enriched peptide from *Cardamine violifolia* on ethanol-induced hepatocyte injury[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 8-12.
- [10] 杨晓, 王畋, 刘畅, 等. 低聚肽和V_c复合固体饮料的抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 179-183.
- YANG X, WANG T, LIU C, et al. The antioxidant properties of oligopeptide and V_c compound solid drink[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(4): 179-183.
- [11] 陈娜. 高F值寡肽与药食同源食品组分联合解酒护肝机制初步研究及产品开发[D]. 烟台: 鲁东大学, 2024: 10-13.
- CHEN N. Study on the mechanism and product development of high fischer ratio oligopeptides combined with medicinal and edible homologous food components to relieve alcohol and protect liver[D]. Yantai: Ludong University, 2024: 10-13.
- [12] SEMA D Ç, GÜLAY Ö, ASLI N A, et al. Biomarkers of oxidative stress and antioxidant defense[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2022, 209: 114477.
- [13] 李聪, 季萌萌, 孟苓凤, 等. 阿胶和阿胶糕不同极性溶剂提取物抗皮肤衰老功效探究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(17): 82-92.
- LI C, JI M M, MENG L F, et al. Study on anti-skin aging effect of different polar solvent extracts of *Colla corii asini* and Ejiao cake[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(17): 82-92.
- [14] 陈瑛琪, 任世利, 刘广志, 等. 阿胶多肽的组成及功能研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 288-294.
- CHEN Y Q, REN S L, LIU G Z, et al. Research progress on composition and function of colla corii asini polypeptide[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 55(2): 288-294.
- [15] 段小波, 杜芳, 王延涛, 等. 阿胶和阿胶肽对血管内皮细胞氧化损伤的作用研究[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(8): 162-167, 180.
- DUAN X B, DU F, WANG Y T, et al. Study on effects of ejiao and ejiao peptide on oxidative injury of vascular endothelial cells[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(8): 162-167, 180.
- [16] 梁荣, 徐乐, 樊琛, 等. 酶解法制备阿胶蛋白肽工艺条件优化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 217-224.
- LIANG R, XU L, FAN C, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process for preparing peptides from *Asini corii colla* and its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(10): 217-224.
- [17] 樊雨梅, 汝文文, 史传超, 等. 阿胶低聚肽的成分分析及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 314-318, 323.
- FAN Y M, RU W W, SHI C C, et al. Composition and its antioxidant activity of *Colla corii asini* oligopeptides[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 314-318, 323.
- [18] XU X B, GUO S W, HAO X H, et al. Improving antioxidant and antiproliferative activities of *Colla corii asini* hydrolysates using ginkgo biloba extracts[J]. *Food Science & Nutrition*, 2018, 6(4): 765-772.
- [19] 杜博玮, 徐晓冰, 郭尚伟, 等. 高抗氧化性小分子阿胶的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 15-20.
- DU B W, XU X B, GUO S W, et al. Preparation of a high-antioxidant hydrolysate from *Colla corii asini*[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 46(6): 15-20.
- [20] 王会迪. 不同成熟阶段椴树蜜的成分分析及其实外抗氧化和抑菌作用的研究[D]. 延吉: 延边大学, 2022: 7-9.
- WANG H D. Component analysis of linden honey at different maturity stages and its antioxidant and antibacterial effects in vitro[D]. Yanji: Yanbian University, 2022: 7-9.
- [21] 尚方圆, 潘丽, 谷克仁, 等. 橄榄叶多酚提取工艺优化及对山茶籽油氧化稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 146-152.
- SHANG F Y, PAN L, GU K R, et al. Optimization of extraction process of polyphenols from olive leaves and its

- effect on oxidative stability of camellia seed oil[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 146-152.
- [22] 肖星凝,袁娅,廖霞,等.食用菌抗氧化活性成分及其抗氧化作用机制研究进展[J].食品与机械,2016,32(11): 207-211.
- XIAO X N, YUAN Y, LIAO X, et al. Research advance on antioxidant active composition and antioxidant mechanisms of edible fungi[J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 207-211.
- [23] LIU R J, ZHANG X H, LIU H H, et al. Revealing the key antioxidant compounds and potential action mechanisms of Bauhinia championii honey based on non-targeted metabolomics, mineralogical analysis and physicochemical characterization[J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143456.
- [24] FAUZI A N, NORAZMI M N, YAACOB N S. Tualang honey induces apoptosis and disrupts the mitochondrial membrane potential of human breast and cervical cancer cell lines[J]. Food Chem Toxicol, 2011, 49(4): 871-878.
- [25] 张金萍.山乌柏蜜改善小鼠酒精肝损伤及肠道菌群的作用和机制[D].南昌:南昌大学,2022: 4-5.
- ZHANG J P. The mechanism of *Triadica cochinchinensis* honey ameliorating alcohol liver damage of mice by adjusting the gut microbiota[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 4-5.
- [26] 周孟焦,何鑫柱,李朝俊,等.竹叶花椒黄酮抗氧化性及协同效应研究[J].食品与机械,2023,39(5): 139-143.
- ZHOU M J, HE X Z, LI C J, et al. Study on antioxidant activity and synergistic effect of flavonoids from *Zanthoxylum armatum* DC[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 139-143.
- [27] TLAK GAJGER I, VLAINIĆ J. Antioxidant activity of honey bee products[J]. Antioxidants, 2025, 14(1): 64.
- [28] 宋露露,李云飞,郑郭芳,等.阿胶复合风味软糖配方优化及体外模拟消化、抗氧化活性分析[J/OL].保鲜与加工.(2025-04-30) [2025-12-23]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1330.s.20250429.1913.002>.
- SONG L L, LI Y F, ZHENG G F, et al. Formulation optimization, *in vitro* simulated digestion and antioxidant activity analysis of *Colla corii asini* compound flavor soft candy[J/OL]. Storage and Process. (2025-04-30) [2025-12-23]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1330.s.20250429.1913.002>.
- [29] 周佳,王丽君,禹洁,等.不同品种蜂蜜氨基酸、多酚类及生物碱类化合物的主成分分析[J].食品研究与开发,2024,45(24): 176-186.
- ZHOU J, WANG L J, YU J, et al. Principal component analysis of amino acids, polyphenol compounds, and alkaloid compounds of honey from different varieties[J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 176-186.
- [30] CHEN Y C, SHI J J, WANG X M, et al. An antioxidant feedforward cycle coordinated by linker histone variant H1.2 and NRF2 that drives nonsmall cell lung cancer progression[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(39): e2306288120.
- [31] 韩兴,吕静,王兴妮,等.白雪茶水提物对乙醇诱导的小鼠急性酒精性肝损伤的干预作用[J].中国食品学报,2024,24(7): 172-181.
- HAN X, LV J, WANG X N, et al. Protective effect and mechanism of aqueous extract of *Thamnolia vermicularis* ach on ethanol-induced acute alcoholic liver injury in mice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(7): 172-181.
- [32] 沈钦海,张盟辉,秦召敏,等.槲皮素预处理调节AMPK/mTOR信号通路介导的自噬途径改善大鼠肝缺血再灌注损伤[J].中国比较医学杂志,2022,32(3): 16-22.
- SHEN Q, ZHANG M, QIN Z, et al. Quercetin pretreatment modulates the autophagy pathway mediated by the AMPK/m TOR signaling pathway and improves liver ischemia-reperfusion injury in rats[J]. Chinese Journal of Comparative Medicine, 2022, 32(3): 16-22.
- [33] 陈瑶,向正国,郑扬.前列地尔联合双歧杆菌对急性胰腺炎患者的疗效及对肠屏障功能和闭合蛋白水平的影响[J].临床急诊杂志,2022,23(1): 15-18, 24.
- CHEN Y, XIANG Z, ZHENG Y. Effect of alprostadiil combined with bifidobacterium on intestinal barrier function and occludin level in patients with acute pancreatitis[J]. Journal of Clinical Emergency, 2022, 23(1): 15-18, 24.
- [34] 林凤屏,陆佳宏,谢瑶瑶,等.蜂蜜的化学活性成分及其功能研究进展[J].福建轻纺,2025(7): 17-22.
- LIN F P, LU J H, XIE Y Y, et al. Research progress on the chemical active components and functions of honey[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2025(7): 17-22.
- [35] XIAO X, CUI T T, QIN S K, et al. Beneficial effects of *Lactobacillus plantarum* on growth performance, immune status, antioxidant function and intestinal microbiota in broilers [J]. Poultry Science, 2024, 103(12): 104280.
- [36] ZHANG F, LI D P, YANG Y W, et al. Combined effects of polystyrene microplastics and copper on antioxidant capacity, immune response and intestinal microbiota of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152099.
- [37] LIU Z Q, YAN C Z, ZHONG S M, et al. Dietary antrodia cinnamomea polysaccharide intervention modulates clinical symptoms by regulating ovarian metabolites and restructuring the intestinal microbiota in rats with letrozole-induced PCOS [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(50): 27 884-27 901.
- [38] YANG W T, HUANG Z H, XIONG H, et al. Rice protein peptides alleviate dextran sulfate sodium-induced colitis via the Keap1-Nrf2 signaling pathway and regulating gut microbiota[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(39): 12 469-12 483.