DOI:10.12441/spyswjs.20241012001 [文章编号] 1673-1689(2026)01-0121-09

# 海棠果多糖对小鼠抗氧化和抗疲劳特性的影响

温织琳[1] 李 明[2*]

(1. 桂林电子科技大学体育部,广西 桂林 541004; 2. 中国科学院大学营养代谢与食品安全重点实验室,北京 101408)

**摘要:【目的】**探究海棠(*Malus spectabilis*)果中活性成分海棠果多糖(MPPs)的抗氧化和抗疲劳特性,并分析其结构与活性之间的关系。**【方法】**采用酸性和碱性2种提取方法制备MPPs(AC-MPC和AL-MPC),通过高效阴离子交换色谱(HPAEC)鉴定多糖组成。通过测定小鼠的体质量变化、血清生化指标及力竭游泳时间,解析MPPs的体内抗氧化和抗疲劳效果。**【结果】**2种多糖均以半乳糖醛酸为主,但AL-MPC总多糖质量分数更高。体内试验证实了2种多糖具有显著的抗氧化与抗疲劳活性,且AL-MPC效果更优。与对照组相比,AL-MPC高剂量组能更大幅度地提升小鼠肝脏抗氧化酶活性,降低丙二醛(MDA)水平。另外,AL-MPC能显著延长小鼠的力竭游泳时间,降低血尿素氮(BUN)、乳酸(LA)和乳酸脱氢酶(LDH)水平。**【结论】**MPPs具有显著的抗氧化和抗疲劳活性,尤其是AL-MPC凭借其独特的结构特征表现出更优的生物活性,为海棠果的高值化利用及功能性食品开发提供了科学依据和潜在原料。

**关键词:**海棠果;多糖;抗氧化;抗疲劳

# Antioxidant and Anti-fatigue Properties of *Malus spectabilis* Fruit Polysaccharides in Mice

*WEN Zhilin*[1] *LI Ming*[2*]

(1. Department of Sports, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Nutrition, Metabolism and Food Safety, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

**Abstract:** [**Objective**] This study aimed to explore the antioxidant and anti-fatigue properties of *Malus spectabilis* fruit polysaccharides (MPPs) and analyze the structure-activity relationships. [**Method**] Two types of MPPs were prepared *via* acidic (AC-MPC) and alkaline (AL-MPC) extraction methods. The polysaccharide composition was identified by high-performance anion-exchange chromatography (HPAEC). The changes in mouse body mass, serum biochemical indicators, and exhaustive swimming time were measured to assess the *in vivo* antioxidant and anti-fatigue effects of MPPs. [**Result**] Galacturonic acid was the main component in both types of MMPs, while AL-MPC had higher mass fraction of total polysaccharides. The *in vivo* experiments demonstrated that both types of MMPs possessed significant antioxidant and anti-fatigue activities. In particular, AL-MPC showcased better performance. Compared with the control group, high-dose AL-MPC substantially enhanced the antioxidant enzyme activities and reduced the malondialdehyde (MDA) level in the mouse liver. In addition, AL-MPC significantly prolonged the exhaustive swimming time of mice and reduced the blood urea nitrogen (BUN), lactic acid (LA), and lactate dehydrogenase (LDH) levels. [**Conclusion**] MMPs have significant antioxidant and anti-fatigue activities. Especially, AL-MPC exhibits more excellent bioactivity due to its unique structural features. This study provides a scientific basis and potential raw materials for the value-added utilization of *Malus spectabilis* fruits and the development of functional foods.

**Keywords:** *Malus spectabilis* fruit; polysaccharide; antioxidant; anti-fatigue

---

**基金项目:**中国科学院开放基金项目(32251578);广西高等教育本科教学改革工程项目(2024JGB189)。

**通信作者:**李明(1974—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品科学及生物技术研究。E-mail: shiyoo01@163.com

**收稿日期:**2024-10-12 **修回日期:**2024-12-19

疲劳是一种复杂的生理状态，表现为机体整体功能或高效工作能力下降，且因过度运动无法保持特定的生理或预定运动水平[1]。氧化应激在疲劳发生的起始阶段发挥着重要作用，抗氧化治疗已成为改善疲劳的有效手段[2-3]。大量研究表明，多糖具有抗疲劳特性[4-6]。海棠果不仅富含碳水化合物、蛋白质、维生素和矿物质等成分[7]，还含有膳食纤维、多酚、黄酮和多糖等多种高价值活性成分[8-9]。因此，探索海棠果及其活性成分的高效利用途径已成为研究热点。已有研究报道了海棠果中的功能性成分在各类食品中的应用，海棠果不仅可直接食用，还可加工为饮料、果脯等产品，甚至用于药品、化妆品等的开发[10]。

近年来，MPPs因其显著的生物活性受到广泛关注。MPPs在对抗氧化损伤方面作用突出[11]，可通过调节氧化平衡、清除自由基等方式保护肝脏，并改善肝脏代谢紊乱[9-13]。然而，目前关于MPPs的研究仍存在不足：首先，不同提取方法对多糖生物活性的影响尚未明确；其次，尽管MPPs的抗氧化特性已被证实，但其抗疲劳特性鲜见报道。因此，本研究旨在阐明MPPs的抗疲劳特性及不同提取方法对其结构和抗疲劳特性的影响。

作者采用酸提取和碱提取2种方法制备了MPPs，通过HPAEC鉴定了多糖组成，并通过测定小鼠的体质量变化、血清生化指标及力竭游泳时间，评估了MPPs的体内抗氧化和抗疲劳效果。本研究可为海棠果多糖在医药和功能食品领域的综合开发和利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

海棠果：采自广西桂林市植物园，样品采集后迅速冻存于液氮中，然后于−80 ℃超低温冰箱保存。岩藻糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、甘露糖醛酸、DPPH、NaOH、乙酸钠、BUN测定试剂盒、LA测定试剂盒、LDH测定试剂盒、MDA测定试剂盒、超氧化物歧化酶（SOD）测定试剂盒、过氧化氢酶（CAT）测定试剂盒：南京建成生物工程研究所有限公司。

### 1.2 仪器与设备

凝胶渗透色谱仪（GPC）：GPC01型，美国Wyatt Technology公司；HPAEC：ICS5000型，德国热电公司；台式大容量低速离心机：TD11A型，青岛精诚仪器仪表有限公司；台式鼓风干燥箱：DHG-9053A型，上海捷呈实验仪器有限公司；冷冻干燥机：FD-ID-50型，上海必朗仪器制造有限公司；旋转蒸发器：RE52CS-1型，上海亚龙生化仪器厂；紫外−可见分光光度计：UV-1100型，上海美普达仪器有限公司。

### 1.3 MMPs的提取与纯化

参照蒋文明等[7]的方法对MMPs进行提取与纯化，见图1。取适量海棠果渣，于55 ℃干燥后粉碎过40目筛，按料液比1 g∶10 mL加入体积分数95%的乙醇，回流8 h以去除杂质及小分子脂溶性物质。过滤后，收集滤渣并干燥，随后加入20倍体积的盐酸溶液（pH 1.5~2.0），于80 ℃提取5 h。提取液用4.0 mol/L的氨水调节pH至中性，离心去除沉淀；上清液于80 ℃经旋转蒸发器浓缩，然后在4 500 *g*条件下离心10 min。取上清液与体积分数95%的乙醇按体积比1∶4混合，充分搅拌后于4 ℃静置24 h。静置完成后，在4 500 *g*条件下离心10 min，收集沉淀并透析（截留相对分子质量为5 000）72 h以去除小分子化合物。通过反复冻融（10次）去除蛋白质，不溶物于4 500 *g*离心10 min，随后将上清液冷冻干燥，获得粗制AC-MPC。取1 g粗制AC-MPC溶解于蒸馏水，离心后取上清液过DEAE-52纤维素阴离子交换柱（20 m×500 m×5 μm）。先用蒸馏水洗涤，再依次用0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mol/L的NaCl溶液以2 mL/min的流量洗脱；随后，用1.0 mol/L NaCl溶液洗脱，用于后续试验。碱提取流程与酸提取类似，采用氨水溶液（pH 9.0~10.0）作为提取溶剂，于80 ℃提取海棠果渣5 h，提取液用4.0 mol/L的盐酸溶液调节pH至中性，其他操作步骤与酸提取一致。

通过苯酚−硫酸法测定MPPs的总糖质量分数，使用紫外−可见分光光度计测定490 nm处的吸光度。通过考马斯亮蓝法测定MPPs的总蛋白质质量分数，使用紫外−可见分光光度计测定590 nm处的吸光度。

### 1.4 MMPs相对分子质量测定

MMPs相对分子质量采用GPC测定，检测系统为ELEOS系统，配备Shodex OHpak SB-806HQ色谱柱（300 mm×8 mm×6 μm），并连接LS检测器

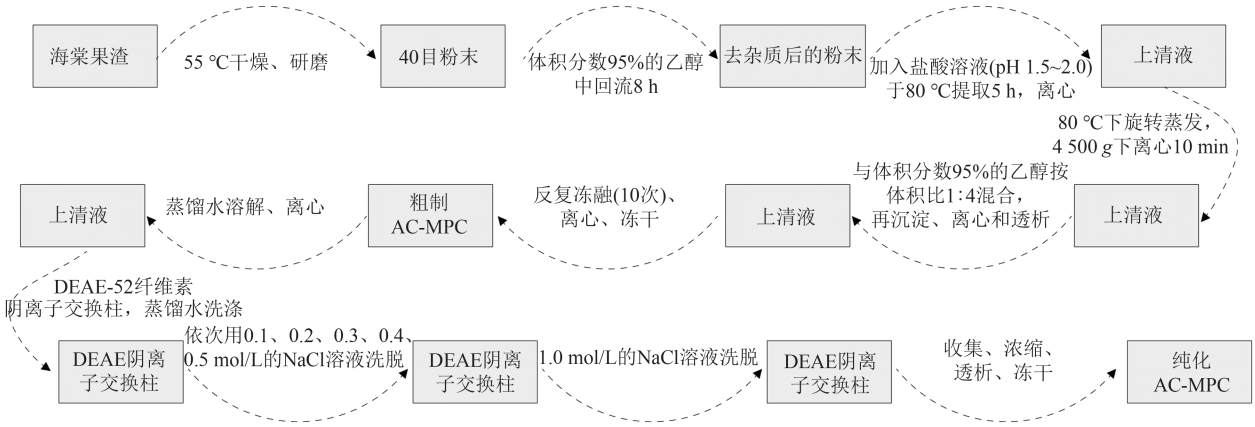



图 1　MPPs的提取与纯化流程图

Fig. 1　Flowchart of the extraction and purification of MPPs

和 RID-10A 折光指数检测器。用蒸馏水溶解 MMPs（2 mg/mL），经 0.22 μm 的水系滤膜过滤后备用。GPC 参数为：流动相为 200 mg/L 的 $NaN_3$ 水溶液，流量 1 mL/min，柱温 40 ℃，进样量 500 μL。

### 1.5　MMPs组成测定

MPPs 的组成采用 HPAEC 分析，准确称取 5.00 mg MPPs 置于洁净色谱瓶中，加入 2.5 mol/L 三氟乙酸溶液混合均匀；将混合物于 121 ℃加热 2 h，然后用氮气吹干；接着，用甲醇洗涤样品，并用氮气吹干 2~3 次。干燥后的样品溶解在 1 mL 无菌水中，稀释 100 倍后转移至色谱瓶中待测。HPAEC 参数为：柱温 30 ℃，流量 0.5 mL/min；以混合单糖标准溶液确定各单糖的保留时间；流动相 A 为超纯水，流动相 B 为 100 mmol/L 的 NaOH 溶液，流动相 C 为 100 mmol/L 的 NaOH 与 200 mmol/L 的 $CH_3COONa$ 混合溶液。

### 1.6　体外抗氧化能力测定

#### 1.6.1　羟自由基清除率

反应体系包括 1.0 mL MMPs 溶液、1.0 mL 4.5 mmol/L 的硫酸亚铁溶液、1.0 mL 4.5 mmol/L 的水杨酸乙醇溶液及 1.0 mL 4.4mmol/L 的过氧化氢，混合均匀后于 37 ℃孵育 60 min。以 VC 为阳性对照，孵育结束后在 510 nm 波长下测定反应体系的吸光度。

#### 1.6.2　DPPH自由基清除率

精确吸取 1.0 mL 不同质量浓度（0.001~2.000 mg/mL）的 MMPs 溶液，与 1.0 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH−甲醇溶液充分混合，于 37 ℃下避光孵育 30 min。以 VC 为阳性对照，孵育结束后在 517 nm 处测量样品溶液的吸光度。

### 1.7　动物分组与饲养

健康雄性小鼠（SPF 级，体质量 18~22 g）：北京维通利华实验动物技术有限公司，动物使用许可证号：SCXK（京）2021-0006。所有小鼠在（22±2）℃、相对湿度（55±10）%、12 h/12 h 光暗循环的清洁级动物房中适应性饲养 7 d。试验方案经桂林电子科技大学实验动物伦理委员会审查批准，伦理审批号：GDUT2023-025。小鼠随机分为 7 组（每组 10 只）：对照（CK）组（灌胃等体积生理盐水）、AC-MPC 低剂量组（50 mg/kg）、AC-MPC 中剂量组（100 mg/kg）、AC-MPC 高剂量组（200 mg/kg）、AL-MPC 低剂量组（50 mg/kg）、AL-MPC 中剂量组（100 mg/kg）、AL-MPC 高剂量组（200 mg/kg）。每天灌胃一次，连续 20 d。试验期间小鼠自由摄食与饮水，每周记录体质量。

### 1.8　体内抗氧化指标测定

末次灌胃后禁食 12 h，小鼠麻醉后摘眼球取血，颈椎脱臼处死后迅速取出肝脏，用预冷的生理盐水冲洗后制备肝组织匀浆。匀浆液于 4 ℃、5 000 *g* 条件下离心 10 min，取上清液，按试剂盒说明书测定 SOD、CAT 活性和 MDA 水平。

### 1.9　体内抗疲劳指标测定

末次灌胃 30 min 后，将小鼠置于水深 30 cm、水温（25±1）℃的游泳箱中，尾部负载质量分数 5%（以小鼠体质量计）的铅片。以小鼠沉入水下 10 s 未能浮出水面为力竭标准，记录力竭游泳时间。游泳结束后立即摘眼球取血，静置 30 min 后于 3 000 *g* 离心 10 min，分离血清。血清中 BUN、LA

和LDH水平均使用相应的试剂盒测定。

### 1.10 数据统计与分析

所有结果均以平均值±标准偏差的形式表示；通过单因素方差分析（ANOVA）和最小显著性差异检验（LSD）确定数据的显著性，$P<0.05$ 表示差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 海棠果多糖的提取、纯化与鉴定结果

AC-MPC和AL-MPC的提取率、总多糖质量分数和总蛋白质质量分数见表1。结果显示，AC-MPC和AL-MPC的提取率分别为（8.16±0.54）%、（6.54±0.37）%，总多糖质量分数分别为（67.14±2.26）%、（75.61±2.90）%。虽然AC-MPC的提取率略高于AL-MPC，但AC-MPC的总多糖质量分数较低。此外，AC-MPC和AL-MPC仅含少量蛋白质，总蛋白质质量分数分别为（4.23±0.27）%和（3.82±0.31）%，表明本研究采用的提取方法可有效去除蛋白质。

表1 MPPs的提取率、总多糖质量分数和总蛋白质质量分数

Table 1 Extraction rate, mass fractions of total polysaccharides and total proteins of MPPs 单位：%

| MPPs | 提取率 | 总多糖质量分数 | 总蛋白质质量分数 |
|---|---|---|---|
| AC-MPC | 8.16±0.54 | 67.14±2.26 | 4.23±0.27 |
| AL-MPC | 6.54±0.37 | 75.61±2.90 | 3.82±0.31 |

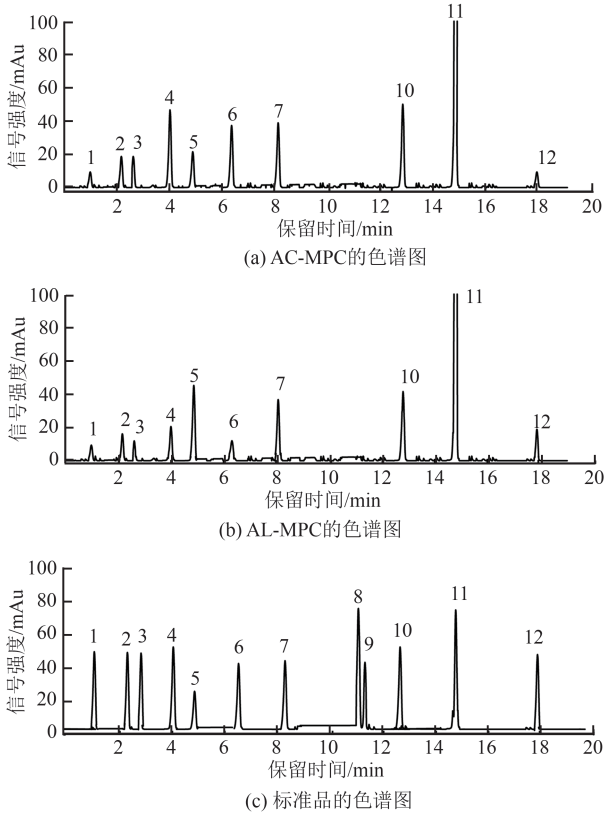
AC-MPC和AL-MPC的相对分子质量见表2。结果显示，AC-MPC的平均相对分子质量为108 020，而AL-MPC的平均相对分子质量为88 160。在AC-MPC样品中，87.5%的多糖相对分子质量为>50 000~200 000；在AL-MPC样品中，79.4%的多糖相对分子质量为10 000~50 000。结果表明，相较于碱性提取法，酸性提取法可获得相对分子质量更高的MPPs。

表2 MPPs的相对分子质量及占比

Table 2 Relative molecular mass and proportion of MPPs

| MPPs | 相对分子质量 | 占比/% |
|---|---|---|
| AC-MPC | 10 000~50 000 | 5.4 |
| | >50 000~200 000 | 87.5 |
| | >200 000 | 7.1 |
| AL-MPC | 10 000~50 000 | 79.4 |
| | >50 000~200 000 | 13.7 |
| | > 200 000 | 6.9 |

采用HPAEC对MPPs中主要的多糖进行定性和定量分析。AC-MPC和AL-MPC的多糖组成见图2。各多糖的洗脱顺序依次为：岩藻糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸及甘露糖醛酸，2种MPPs中均未检测到果糖和核糖，这与Chen等[14]的研究结果一致。




(a) AC-MPC的色谱图

(b) AL-MPC的色谱图

(c) 标准品的色谱图

1—岩藻糖；2—阿拉伯糖；3—鼠李糖；4—半乳糖；5—葡萄糖；6—木糖；7—甘露糖；8—果糖；9—核糖；10—半乳糖醛酸；11—葡萄糖醛酸；12—甘露糖醛酸。

图2 MPPs的色谱图

Fig. 2 Chromatograms of MPPs

AC-MPC和AL-MPC的单糖占比见表3。AC-MPC与AL-MPC的多糖组成差异主要源于所采用的提取方法不同。其中，岩藻糖、阿拉伯糖、鼠李糖及甘露糖醛酸在2种多糖中的占比均低于5%；而半乳糖醛酸在2种多糖中占比均最高，在AC-MPC中的占比为40.41%，在AL-MPC中高达51.83%。

### 2.2 MPPs的体外抗氧化活性

羟自由基是一类氧化性极强的活性氧（ROS），能够与细胞内的生物大分子发生反应，进

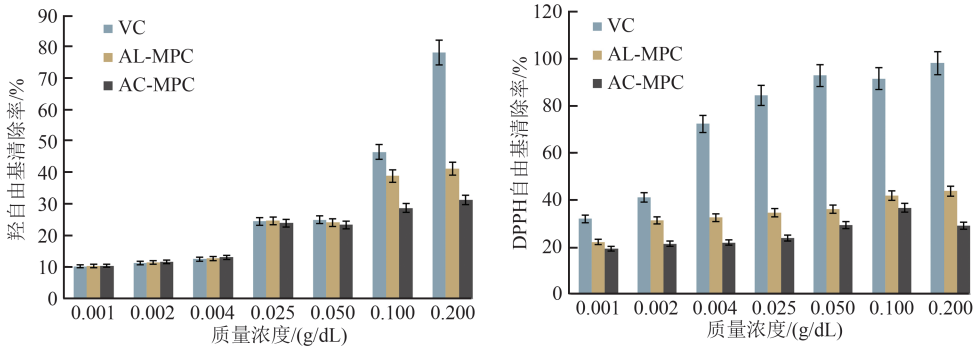
而造成细胞损伤[15]。AC-MPC和AL-MPC在0.001~0.200 g/dL时的羟自由基清除率见图3(a)。各样品中羟自由基清除率的排序为：VC>AL-MPC>AC-MPC。在0.200 g/dL的质量浓度下，AL-MPC与AC-MPC的羟自由基清除率分别为41.25%和31.22%，而VC的羟自由基清除率高达78.19%。结果表明，相较于AC-MPC，AL-MPC具有更显著的羟自由基清除能力。

DPPH自由基是一种性质稳定的自由基，其最大吸收波长为517 nm，DPPH自由基清除率是评估抗氧化剂清除自由基能力的典型指标[16]。如图3(b)所示，AL-MPC和AC-MPC的DPPH自由基清除能力均低于VC，且2种多糖的DPPH自由基清除能力呈剂量依赖性升高。在0.200 g/dL的质量浓度下，AC-MPC和AL-MPC的DPPH自由基清除率分别为43.82%和29.19%，而VC的DPPH自由基清除率高达98.15%。结果表明，AL-MPC的DPPH自由基清除能力优于AC-MPC。

**表3　MPPs中各单糖占比**

Table 3　Proportions of different monosaccharides in MPPs

| MPPs | 占比/% | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 岩藻糖 | 阿拉伯糖 | 鼠李糖 | 半乳糖 | 葡萄糖 | 木糖 | 甘露糖 | 半乳糖醛酸 | 葡萄糖醛酸 | 甘露糖醛酸 |
| AC-MPC | 1.92 | 3.90 | 3.84 | 10.10 | 4.24 | 7.52 | 7.68 | 40.41 | 18.59 | 1.82 |
| AL-MPC | 1.71 | 3.72 | 2.30 | 3.86 | 8.25 | 2.11 | 7.39 | 51.83 | 15.17 | 3.65 |




(a) 羟自由基清除能力　(b) DPPH自由基清除能力

图3　MPPs的羟自由基清除能力和DPPH自由基清除能力

Fig. 3　Hydroxyl free radical scavenging activity and DPPH free radical scavenging activity of MPPs

## 2.3　MPPs的体内抗氧化活性

在运动过程中，自由基的过量积累会破坏机体氧化-抗氧化平衡，这是引发疲劳的主要诱因[17]。而当ROS被清除后，这种平衡状态即可得到恢复[18]。因此，通过提高机体抗氧化能力、降低有害代谢产物浓度能够有效缓解疲劳症状。抗氧化酶(如SOD、CAT等)是机体对抗自由基的第一道防线，两者协同作用可减少ROS生成，避免脂质过氧化及代谢中间体对机体造成损伤[19]。有研究报道，抗氧化酶活性的提升有助于改善疲劳状态[20]。

小鼠连续20 d的体质量结果见表4。AC-MPC组和AL-MPC组的初始体质量和最终体质量与对照组相比无显著差异，表明AC-MPC和AL-MPC对小鼠体质量无显著影响。本研究对小鼠肝脏中的SOD、CAT活性和MDA水平进行了测定，以评估MPPs的体内抗氧化活性，见图4。结果表明，AC-MPC(低、中、高剂量)组和AL-MPC(低、中、高剂量)组的SOD活性明显高于CK组。

**表4　小鼠连续20 d的体质量**

Table 4　Body mass of mice in 20 consecutive days

| 组别 | 剂量 | 体质量/g | |
|---|---|---|---|
| | | 初始 | 最终 |
| CK组 | | 21.1±0.12 | 35.4±0.12 |
| AC-MCP组 | 低剂量 | 21.1±0.23 | 35.8±0.08 |
| | 中剂量 | 21.1±0.12 | 35.1±0.27 |
| | 高剂量 | 21.5±0.17 | 35.7±0.24 |
| AL-MCP组 | 低剂量 | 21.4±0.15 | 35.5±0.11 |
| | 中剂量 | 21.2±0.24 | 35.9±0.13 |
| | 高剂量 | 21.1±0.31 | 35.1±0.12 |

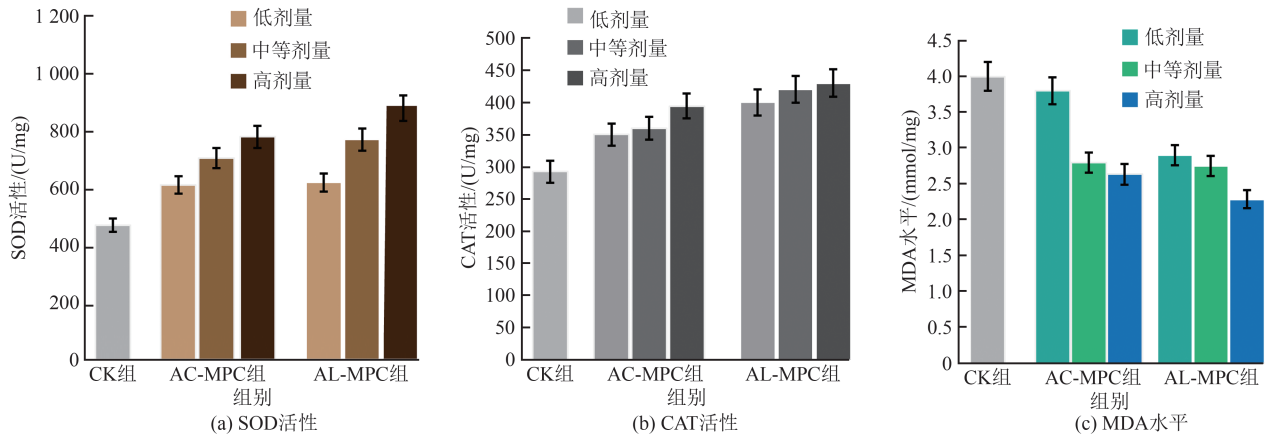



图 4 MPPs对小鼠体内抗氧化活性的影响

Fig. 4 *In vivo* antioxidant effects of MPPs in mice

其中，AC-MPC（低、中、高剂量）组的SOD水平分别为CK组的1.27倍、1.35倍、1.48倍。而AL-MPC（低、中、高剂量）组的SOD活性分别为CK组的1.27倍、1.48倍、1.69倍。进一步分析可知，AL-MPC高剂量组的SOD活性明显高于AC-MPC组；而AL-MPC低剂量和中剂量组的SOD活性与AC-MPC组相比差异不显著。

AC-MPC（低、中、高剂量）组和AL-MPC（低、中、高剂量）组的CAT活性分别为331.11、339.53、382.83 U/mg和399.82、415.54、423.20 U/mg，分别是CK组（282.67 U/mg）的1.17倍、1.20倍、1.35倍和1.41倍、1.47倍、1.50倍。AC-MPC组和AL-MPC组的CAT活性均明显高于CK组；但AC-MPC组的CAT活性增量较小，AL-MPC组的CAT活性增量较大，且AL-MPC中、高剂量组的CAT活性明显高于AC-MPC组。结果表明，与AC-MPC相比，AL-MPC能更显著地提升SOD、CAT这2种抗氧化酶的酶活性，表明AL-MPC可更有效地缓解疲劳相关氧化应激带来的损害。

自由基的大量聚集会导致MDA水平上升，这一现象是组织细胞受损的重要标志，因此高MDA水平是诱发疲劳的关键因素[21]。结果表明，2种多糖处理的小鼠的肝脏MDA水平均明显低于CK组，且AL-MPC高剂量组的MDA水平明显低于AC-MPC组。其中，AC-MPC（低、中、高剂量）组和AL-MPC（低、中、高剂量）组的肝脏MDA水平分别为3.82、2.83、2.76 mmol/mg和2.97、2.79、2.23 mmol/mg，分别是CK组（3.98 mmol/mg）的95.98%、71.11%、69.34%和74.62%、70.10%、56.03%。即AC-MPC高剂量组的MDA水平较CK组降低了30.65%，而AL-MPC高剂量组的MDA水平较CK组降低了43.97%。结果表明，与AC-MPC相比，AL-MPC具有更强的抗氧化活性，在本研究所考察的剂量范围内展现出更优越的抗疲劳特性。高效抗氧化剂可在运动过程中更快速地清除过量自由基，从而避免运动性疲劳发生时心肌和骨骼肌脂质因脂质自由基过氧化而出现损伤。

### 2.4 MPPs的体内抗疲劳特性

作者通过小鼠力竭游泳试验（exhaustive swimming exercise，ESE）分析了MPPs对小鼠运动耐力的影响，见图5（a）。与CK组相比，AC-MPC与AL-MPC均可明显延长小鼠的力竭游泳时间。其中，AC-MPC（低、中、高剂量）组和AL-MPC（低、中、高剂量）组的力竭游泳时间分别为17.61、18.27、19.57 min和18.24、22.48、23.69 min，分别为CK组（16.67 min）的1.06倍、1.10倍、1.17倍和1.09倍、1.35倍、1.42倍。结果表明，AC-MPC和AL-MPC均能以剂量依赖性方式延长小鼠力竭游泳时间，表现出明显的抗疲劳活性。此外，AL-MPC各剂量组的力竭游泳时间均明显高于AC-MPC组，表明AL-MPC的抗疲劳效果优于AC-MPC。

当机体能量供应不足时，蛋白质与氨基酸的分解代谢增强，导致尿素氮水平上升[22]。BUN是肝脏蛋白质代谢的终产物，其在体内的过量积累易诱发疲劳，是评价机体疲劳程度的重要血清指标[23]。LA是高强度运动时机体缺氧状态下糖酵解的产物，过量积累不仅会损伤相关组织器官，还

会降低肌肉与血液的pH，进而引发疲劳，因此LA同样是衡量疲劳程度的重要血清指标[24]。LDH水平是反映肌肉活动状态的准确指标，血清LDH水平升高通常说明肌肉发生损伤，因此LDH水平也是作为评估机体疲劳程度的指标[1]。为进一步探究AC-MPC和AL-MPC的抗疲劳效果，作者在ESE测试结束后，检测了小鼠血清中BUN、LA和LDH水平这3项生化指标，见图5(b)~(d)。

由图5(b)可知，AC-MPC与AL-MPC的摄入均可明显降低BUN水平。其中AC-MPC(低、中、高剂量)组和AL-MPC(低、中、高剂量)组的BUN浓度分别为18.46、16.31、13.94 mmol/L和18.87、16.24、12.23 mmol/L，分别为CK组(21.54 mmol/L)的85.70%、75.72%、64.72%和87.60%、75.39%、56.78%。与CK组相比，AC-MPC与AL-MPC高剂量组的BUN浓度均明显降低，且AL-MPC高剂量组的BUN浓度明显低于AC-MPC高剂量组。AC-MPC高剂量组的BUN浓度比CK组低35.28%，而AL-MPC高剂量组较CK组低43.22%。结果表明，AC-MPC与AL-MPC均可通过降低BUN水平来增加小鼠的抗疲劳能力。

由图5(c)可知，小鼠血清LA水平随AC-MPC和AL-MPC质量浓度的升高呈剂量依赖性降低。AC-MPC(低、中、高剂量)组和AL-MPC(低、中、高剂量)组的LA水平分别为6.54、4.52、3.88 mmol/L和6.44、3.44、2.13 mmol/L。与CK组(7.82 mmol/L)相

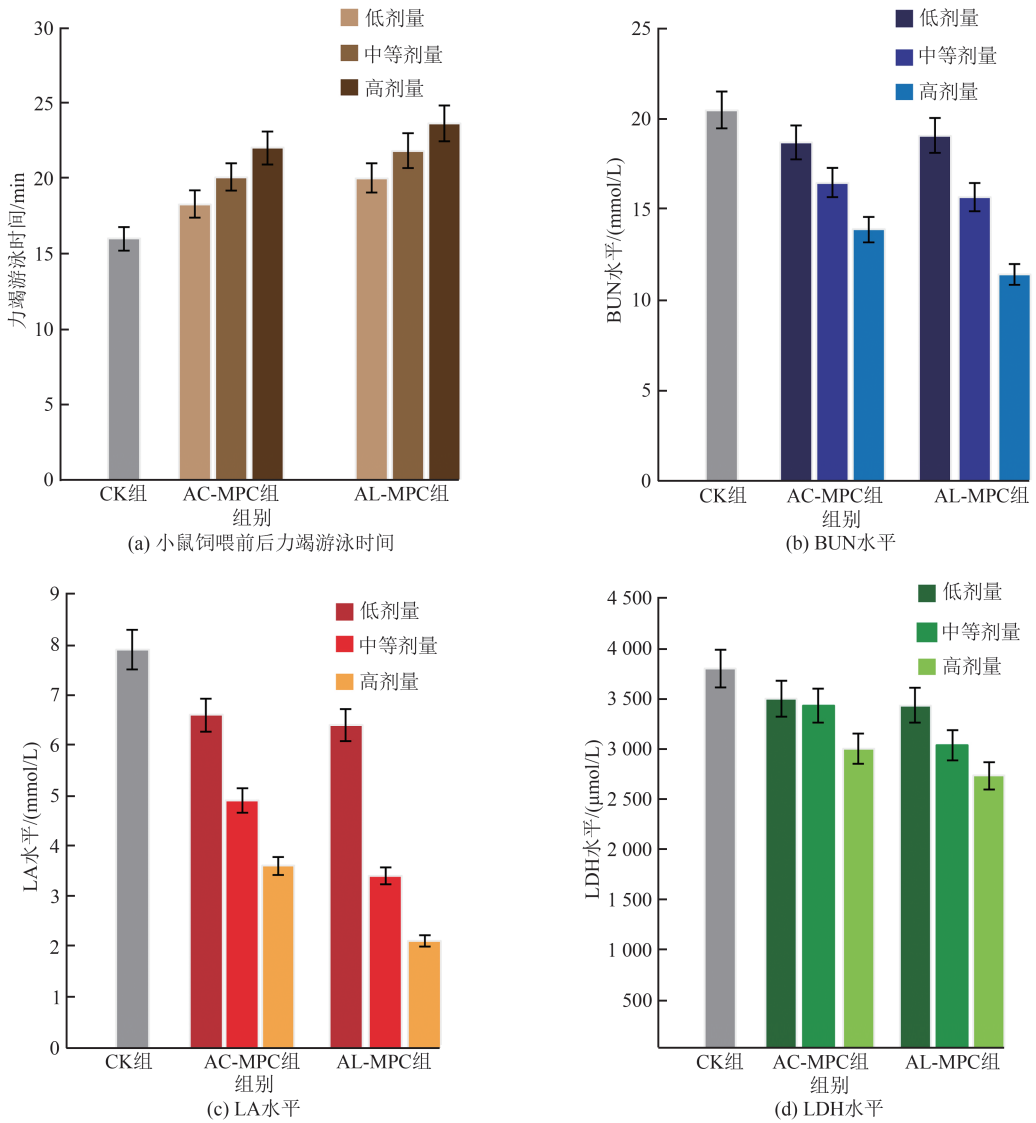



图5　MPPs对小鼠抗疲劳参数的影响

Fig. 5　Anti-fatigue effects of MPPs in mice

比，AC-MPC与AL-MPC各剂量组的血清LA水平明显降低，其中AC-MPC高剂量组和AL-MPC高剂量组分别降低了50.38%和72.76%。此外，AL-MPC组的小鼠血清LA水平均明显低于相同剂量的AC-MPC组。结果表明，AC-MPC与AL-MPC可通过降低血清LA水平来提高小鼠的抗疲劳能力。

由图5(d)可知，AC-MPC(低、中、高剂量)组和AL-MPC(低、中、高剂量)组的LDH水平分别为3 440.11、3 416.26、2 959.07 U/L和3 314.62、2 953.3、2 711.54 U/L。与CK组(3 740.11 U/L)相比，MPPs处理组的LDH水平均有所降低，表明2种MPPs均可在小鼠力竭游泳过程中减轻肌肉损伤。进一步分析可知，AC-MPC组与AL-MPC中、高剂量组的小鼠血清LDH水平降低更明显，其中AC-MPC高剂量组和AL-MPC高剂量组较CK组分别降低了20.88%和27.50%。综上，AC-MPC与AL-MPC均呈现出剂量依赖性的抗疲劳活性，且AL-MPC的作用效果优于AC-MPC，这一结果与ESE的结果一致。结果表明，AC-MPC与AL-MPC可通过降低血清LDH水平增加小鼠的抗疲劳能力。

## 3 结论

本研究首先采用酸性和碱性提取方法成功制备了AC-MPC和AL-MPC。通过生化分析和色谱鉴定，发现这2种多糖在分子结构上存在显著差异，这些结构差异直接影响了其生物活性。在抗氧化能力方面，AL-MPC展现出更强的自由基清除能力，这与其较低的相对分子质量和较丰富的支链结构密切相关。自由基清除能力的提高对预防氧化应激引发的细胞损伤具有重要意义，在生物医学领域具有广泛的应用前景。此外，体内试验结果表明，AL-MPC具有更佳的抗疲劳效果，这一结论通过小鼠的力竭游泳时间延长得到验证。抗疲劳效果的提升可能与AL-MPC改善体内氧化-抗氧化平衡有关，血清中尿素氮、乳酸和乳酸脱氢酶水平的降低进一步证实了这一机制。值得注意的是，AL-MPC在提高抗氧化酶活性方面也表现出显著效果，这有助于减少活性氧的生成，避免脂质过氧化及代谢中间体对机体造成的损伤。为阐明AL-MPC的抗疲劳机制提供了新视角，也为其在运动营养和恢复领域的应用奠定了基础。此外，本研究还为海棠果这一未充分利用的农作物副产品提供了新的综合利用途径。通过提取和应用这些功能性成分，不仅可提升农业副产品的附加值，还有助于推动可持续农业与循环经济的发展。海棠果多糖的发现与应用，为食品、药品及保健品行业提供了一种潜在的天然、安全且有效的原料来源。综上所述，本研究不仅在分子层面阐明了海棠果多糖的结构特征，还在细胞与整体水平验证了其生物活性。这些发现为海棠果多糖在医药、功能食品开发中的应用提供了坚实的基础。未来，将进一步探究这些多糖的分子机制及其在不同条件下的应用潜力，以期为人类健康作出更大的贡献。

## 参考文献

[1] HUANG L Z, HUANG B K, LIANG J, et al. Antifatigue activity of the liposoluble fraction from *Acanthopanax senticosus* [J]. Phytotherapy Research, 2011, 25(6): 940-943.

[2] SHAO S, WANG M X, ZHANG H Y, et al. Antifatigue activity of glycoprotein from *Schisandra chinensis* functions by reducing oxidative stress[J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2020, 2020(1): 4231340.

[3] KOU G N, WU J J, LIU M, et al. *Citrus* tangeretin reduces the oxidative stress of the myocardium, with the potential for reducing fatigue onset and myocardial damage [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 54: 249-253.

[4] SHAN X Z, ZHOU J L, MA T, et al. *Lycium barbarum* polysaccharides reduce exercise-induced oxidative stress [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12(2): 1081-1088.

[5] XIE Q, SUN Y T, CAO L L, et al. Antifatigue and antihypoxia activities of oligosaccharides and polysaccharides from *Codonopsis pilosula* in mice [J]. Food & Function, 2020, 11(7): 6352-6362.

[6] ZHAO X N, LIANG J L, CHEN H B, et al. Anti-fatigue and antioxidant activity of the polysaccharides isolated from *Millettiae speciosae* Champ. Leguminosae [J]. Nutrients, 2015, 7(10): 8657-8669.

[7] 蒋文明，周石洋. 椰子皮多糖的提取、结构表征及生物活性研究[J]. 中国食品添加剂，2023，34(5)：111-118.
JIANG W M, ZHOU S Y. Extraction, structure characterization and biological activity of polysaccharide from coconut peel[J]. China Food Additives, 2023, 34

(5)：111-118.(in Chinese)

[8] 王鑫磊，周聪，高保军，等. 灰树花海棠果发酵饮料研制及其抗疲劳活性研究[J]. 中国酿造，2022，41(12)：52-55.
WANG X L，ZHOU C，GAO B J，et al. Development and anti-fatigue activity of fermented *Grifola frondosa* crabapple beverage[J]. China Brewing，2022，41(12)：52-55.(in Chinese)

[9] 段永芳，林冬梅，宋惠月. 海棠果的功效成分及生物学功效评价研究进展[J]. 食品安全导刊，2022(19)：129-132.
DUAN Y F，LIN D M，SONG H Y. Research progress on functional components and biological efficacy evaluation of *Begonia* fruit[J]. China Food Safety Magazine，2022(19)：129-132.(in Chinese)

[10] 耿一然，高寿利，孙纪霞，等. 花果兼用海棠的育种研究进展[J]. 烟台果树，2022(2)：1-4.
GENG Y R，GAO S L，SUN J X，et al. Research progress on breeding of *Begonia* for both flowers and fruits[J]. Yantai Fruits，2022(2)：1-4.(in Chinese)

[11] 庄雨涵，王荣，杜茜. 木本海棠活性物质研究进展[J]. 生物化工，2021，7(4)：124-129.
ZHUANG Y H，WANG R，DU X. Advance in studies on woody crabapple active substances[J]. Biological Chemical Engineering，2021，7(4)：124-129.(in Chinese)

[12] 刘晓伟，王萌蕾，牛恒林. 观赏海棠果多糖的乙酰化修饰及其对油脂抗氧化研究[J]. 食品科技，2023，48(5)：185-191.
LIU X W，WANG M L，NIU H L. Acetylation modification and antioxidant effect on oil of polysaccharide from ornamental *Begonia* fruit[J]. Food Science and Technology，2023，48(5)：185-191.(in Chinese)

[13] 鲍梦圆，王海歌，徐心雨，等. 海棠生物活性物质及健康功能研究进展[J]. 中国食品工业，2023(3)：92-94，97.
BAO M Y，WANG H G，XU X Y，et al. Research progress on bioactive substances and health functions of *Begonia*[J]. China Food Industry，2023(3)：92-94，97.(in Chinese)

[14] CHEN L，LIU L，LI C X，et al. A mix of apple pomace polysaccharide improves mitochondrial function and reduces oxidative stress in the liver of high-fat diet-induced obese mice[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2017，61(3)：1600433.

[15] LIU C H，WANG C H，XU Z L，et al. Isolation，chemical characterization and antioxidant activities of two polysaccharides from the gel and the skin of *Aloe barbadensis* Miller irrigated with sea water[J]. Process Biochemistry，2007，42(6)：961-970.

[16] AK T，GÜLÇIN I. Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin[J]. Chemico-Biological Interactions，2008，174(1)：27-37.

[17] TENG Y S，WU D. Anti-fatigue effect of green tea polyphenols(−)-epigallocatechin-3-gallate (EGCG)[J]. Pharmacognosy Magazine，2017，13(50)：326-331.

[18] TANG W M，JIN L，XIE L H，et al. Structural characterization and antifatigue effect *in vivo* of maca (*Lepidium meyenii* Walp) polysaccharide[J]. Journal of Food Science，2017，82(3)：757-764.

[19] LIN Y，LIU H L，FANG J，et al. Anti-fatigue and vasoprotective effects of quercetin-3-*O*-gentiobiose on oxidative stress and vascular endothelial dysfunction induced by endurance swimming in rats[J]. Food and Chemical Toxicology，2014，68：290-296.

[20] YOU L J，ZHAO M M，REGENSTEIN J M，et al. *In vitro* antioxidant activity and *in vivo* anti-fatigue effect of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) peptides prepared by papain digestion[J]. Food Chemistry，2011，124(1)：188-194.

[21] LI F X，YANG Z L，LU Y，et al. Malondialdehyde suppresses cerebral function by breaking homeostasis between excitation and inhibition in turtle *Trachemys scripta*[J]. PLoS One，2010，5(12)：e15325.

[22] WANG Q，WANG F，XU Z H，et al. Bioactive mushroom polysaccharides：a review on monosaccharide composition，biosynthesis and regulation[J]. Molecules，2017，22(6)：995.

[23] QI B，LIU L，ZHANG H，et al. Anti-fatigue effects of proteins isolated from *Panax quinquefolium*[J]. Journal of Ethnopharmacology，2014，153(2)：430-434.

[24] KIM N H，MOON P D，PAK S C，et al. Anti-fatigue effect of *Zizania caudiflora* (Turczaninow) Nakai[J]. The American Journal of Chinese Medicine，2012，40(1)：111-120.