DOI:10.12441/spyswjs.20250510002 [文章编号] 1673-1689(2026)03-0163-10

油橄榄果渣提取物对小鼠的抗疲劳作用研究

吴燕华[1] 李 明[2*]

(1. 河南财政金融学院体育与健康管理学院,河南 郑州 450046; 2. 中国科学院大学营养代谢与食品安全重点实验室,北京 100101)

摘要:【目的】评估油橄榄果渣(OP)提取物对小鼠的抗疲劳作用。**【方法】**对5个不同品种油橄榄的果渣进行酚类物质富集处理,采用高效液相色谱(HPLC)进行定量检测与分析。通过对小鼠力竭游泳时间、前肢握力和生化指标进行分析,系统评估OP提取物的抗疲劳效果。**【结果】**‘戈达尔’品种的OP提取物具有最高的总酚质量分数和抗氧化活性。动物试验结果显示,OP提取物可显著延长小鼠的力竭游泳时间、增强前肢握力,同时降低小鼠血清氨与血糖水平,上调血尿素氮(BUN)和血清肌酸激酶(CK)水平,表明该提取物可有效促进运动后肌肉恢复,缓解运动诱导的代谢应激。此外,组织病理学结果表明,补充OP提取物未对小鼠主要脏器造成损伤,具备良好的安全性。**【结论】**该研究为OP的高值化利用提供了科学依据,同时为研发天然安全的抗疲劳补充剂提供了技术参考。

关键词:油橄榄;果渣;酚类物质;抗氧化;抗疲劳

Anti-fatigue Effects of Olive Pomace Extracts in Mice

WU Yanhua[1] *LI Ming*[2*]

(1. College of Physical Education and Health Management, Henan Finance University, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory of Nutrition, Metabolism and Food Safety, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [**Objective**] The study aimed to evaluate the anti-fatigue effects of olive pomace (OP) extracts in mice. [**Method**] Phenolic compounds were enriched from the pomace of five olive varieties and quantified and analyzed *via* high-performance liquid chromatography (HPLC). The anti-fatigue effects of OP extracts in mice were systematically assessed through exhaustive swimming, forelimb grip strength, and biochemical indicator. [**Result**] The OP extract of ‘Gordal’ had the highest total phenol mass fraction and antioxidant activity. The animal test results demonstrated that OP extracts significantly prolonged exhaustive swimming time, enhanced forelimb grip strength, and reduced serum ammonia and blood glucose levels while increasing blood urea nitrogen (BUN) and serum creatine kinase (CK) levels, suggesting its potential to improve muscle recovery after exercise and alleviate exercise-induced metabolic stress. Furthermore, histopathological examinations revealed no organ damage caused by OP extract supplementation. [**Conclusion**] This study not only provides scientific evidence for the high-value-added utilization of OP but also offers new technical insights into the development of natural safe supplements with anti-fatigue effects.

Keywords: olive; pomace; phenolic compound; antioxidant; anti-fatigue

全球食品产业在满足人类营养供给的同时,每年会产生约20亿t有机副产物,这类废弃物的处理已成为全球性的环境难题[1-3]。近年来,随着循环经济理念的深化,学术界对农业副产品高值

基金项目:中国科学院开放基金项目(32251578)。

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:wuyanhua212@163.com

收稿日期:2025-05-10 **修回日期:**2025-07-09

化利用的相关研究呈爆发式增长。目前相关研究多聚焦于谷物加工副产品，针对地中海特色作物——油橄榄加工废弃物的系统性研究仍较少[4-6]。这一研究现状与橄榄油产业规模极不匹配，全球橄榄油产业每年约产生 1 000 万 t 加工废弃物，其中地中海地区的加工废弃物占比高达 85%[7]。此外，橄榄油厂废弃物的处置问题也尤为突出。该废弃物具有高植物毒性，主要原因是其含有高质量浓度的酚类物质（2.5~8.0 g/L），而这类功能性成分在传统处理工艺中大多被降解，未能实现有效回收利用[8]。然而，这类被视为“环境毒素”的物质，实则是极具开发价值的生物活性化合物。油橄榄废弃物中的羟基酪醇、橄榄苦苷等酚类物质的抗氧化活性是维生素 E 的 10~15 倍，但其全球回收利用率不足 5%[9]。这种资源浪费现状与欧盟“从农场到餐桌”战略中提出的“零废物”发展目标形成鲜明反差。

在酚类化合物的开发应用研究中，目前仍存在两大技术瓶颈：一是传统有机溶剂提取方法的提取效率较低，酚类物质得率不足 30%，且易造成二次污染；二是现有研究多聚焦于体外抗氧化活性评价，缺乏体内功效验证与作用机制解析[10]。疲劳综合征已被世界卫生组织（WHO）列为 21 世纪威胁人类健康的主要问题之一，全球发病率约为 20%，但依托农业副产物开发天然抗疲劳制剂的研究仍处于探索阶段[11]。已有研究表明，橄榄多酚可能通过调控 Nrf2/ARE 信号通路来缓解氧化应激性疲劳，但这一假说仍需充足的试验证据支撑[12-13]。

基于此，作者以‘佛奥’‘皮瓜尔’‘科拉蒂那’‘米扎’‘戈达尔’5 个油橄榄品种的果渣为研究对象，首先系统分析了不同品种 OP 的基础营养组成差异；其次通过 HPLC 对 OP 中的主要酚类物质进行定性与定量分析，同时采用多种体外抗氧化体系评价不同品种 OP 提取物的抗氧化活性；最后通过构建小鼠强迫游泳模型，综合评价 OP 提取物的体内抗疲劳效果。本研究旨在明确不同油橄榄果渣的营养物质与酚类物质特征，筛选高抗氧化活性品种，阐明 OP 提取物的抗疲劳作用潜力，为油橄榄果渣的高值化利用及天然抗疲劳功能食品的开发提供科学依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

5 个油橄榄品种即‘佛奥’‘皮瓜尔’‘科拉蒂那’‘米扎’‘戈达尔’的新鲜 OP 于 2023 年在陇南武都收集。首先对 OP 进行蒸汽漂白处理，利用蒸汽漂白器在常压条件下处理 3 min，使样品温度升至 80 ℃，进行酶灭活处理，以减少酚类物质损失。随后进行核皮分离处理，样品依次经过 0.15、0.45 cm 孔径的筛网，干燥后使用磨粉机对 OP 样品进行粉碎，备用。

正己烷、甲醇、乙醇、醋酸、乙腈等：色谱纯，国药集团化学试剂有限公司；Sephadex LH-20 色谱柱：安捷伦科技（中国）有限公司；β-胡萝卜素褪色检测试剂盒、$ABTS^{+}$自由基清除能力测定试剂盒、2-二苯基-1-苦基肼（DPPH）自由基清除能力测定试剂盒：上海博尔森生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

HPLC 系统：Agilent 1290 型，安捷伦科技（中国）有限公司；DAD 检测器：1260 Infinity DAD 型，安捷伦科技（中国）有限公司；小鼠圆柱形游泳池：JZ-XSC 型，北京九州晟欣科技有限公司；乳酸、氨、血糖自动分析仪：Hitachi 7060 型，日本株式会社日立制作所；低力测试系统：Model-RX-5 型，日本 Aikoh Engineering 公司。

1.3 方法

1.3.1 OP 的物质组成测定

称取 5 g OP 样品，于 105 ℃烘烤 48 h 至恒质量，冷却后称质量，计算样品的水分质量分数。称取 1 g OP 样品并测定其氮元素质量，结合蛋白质换算系数 6.25 计算蛋白质质量分数。称取 10 g OP 样品，以正己烷为提取溶剂，用索氏抽提法测定总脂肪质量分数。称取 3 g OP 样品，于 550 ℃高温灼烧 16 h，冷却后称质量并计算灰分质量分数[14]。各指标测定均设置 3 次重复试验，其中总碳水化合物质量分数采用差值法计算。

1.3.2 OP 中酚类化合物的提取分离及鉴定

参照文献[15-16]的方法提取 OP 中的酚类化合物（TPC）。称取 200 g OP 样品置于 1 000 mL 烧杯中，加入 500 mL 正己烷混合均匀，每 30 min 轻轻搅拌一次，避光静置 2 h 以去除油脂，该步骤重复 2 次。脱脂完成后，用纸巾覆盖烧杯口，室温避光过

夜晾干，得到脱脂油橄榄果渣（DOP）。精确称取0.25 g DOP，加入5 mL不同的提取溶剂（水、质量分数70%甲醇、质量分数70%乙醇）混合，超声处理5 min后避光间歇振荡3 h。提取完成后，以4 000 r/min离心10 min，收集上清液，重复提取以确保TPC得率，所有提取物均于室温下避光保存。

TPC首先通过石油醚脱脂，随后依次采用$CHCl_3$、$CHCl_3$-CH_3OH（体积比9∶1）和CH_3OH连续浸泡提取48 h。CH_3OH提取物经Sephadex LH-20色谱柱分离，以CH_3OH为洗脱剂。采用Agilent 1290 HPLC系统和DAD检测器，参照Sinrod等[17]的方法进行酚类化合物的鉴定。色谱检测条件为：采用C18色谱柱，流动相A为体积分数3%的醋酸-水溶液，流动相B为甲醇-乙腈等体积混合溶液，流量1.0 mL/min，进样量20 μL。洗脱程序为：0~25 min，流动相B体积分数从5%升至30%；25~35 min，流动相B体积分数从30%升至35%；35~40 min，流动相B体积分数从35%升至40%；40~50 min，流动相B体积分数从40%升至70%；50~55 min，流动相B体积分数从70%升至100%；55~60 min，流动相B体积分数从100%降至5%；60~65 min，流动相B体积分数为5%。设置多波段检测波长，280 nm下检测羟基酪醇等成分，320 nm下检测咖啡酸等成分，365 nm下检测芦丁等成分。配制10~100 mg/L的标准品溶液，绘制标准曲线，用于组分定量。最后采用β-胡萝卜素褪色试验、$ABTS^+$自由基清除能力、DPPH自由基清除能力评估OP提取物的抗氧化活性[18-20]。

1.3.3 小鼠力竭游泳时间测试

选取6月龄的ICR小鼠（动物许可证号为SYXK（豫）2025-0003，动物试验伦理审查号为UCAS-IACUC-2025-112）。随机分为4组，每组10只，分别为对照组（Vehicle组）、OP-1X补充组（OP-1X组）、OP-3X补充组（OP-3X组）以及OP-6X补充组（OP-6X组）。OP-1X、OP-3X和OP-6X的OP剂量分别为1、3、6 g/（kg·d）。所有OP样品均溶解于蒸馏水中，Vehicle组小鼠灌胃等体积蒸馏水，每日灌胃1次，连续干预28 d。试验期间每日监测小鼠饮水量和摄食量，每周记录小鼠体质量。

末次灌胃30 min后，测定小鼠从开始到力竭的游泳时间，用于评估小鼠耐力；用低力测试系统收集小鼠的前肢绝对握力数据[21]。力竭游泳测试参照Kan等[21]的方法，将小鼠单独放置在一个圆柱形（高65 cm、半径20 cm）游泳池中，水深保持在40 cm，水温控制在（24±1）℃。在小鼠尾巴根部绑定相当于其体质量5%的负重物，记录每组小鼠从入水至力竭的游泳时长。小鼠力竭判断标准为小鼠停止游泳，游泳期为小鼠在水中漂浮、挣扎和进行必要动作直到力量耗尽和溺水的时间。

1.3.4 疲劳相关生化指标测定

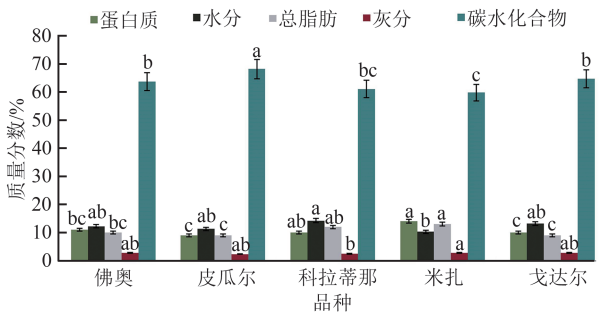
OP提取物干预28 d后，对小鼠进行15 min的无负重游泳测试，分别于游泳前、游泳后、休息20 min后采集小鼠血样，测定血清乳酸、氨和血糖等疲劳相关生化指标。连续干预30 d后，小鼠静息60 min，随后进行90 min持续性游泳运动，检测CK和BUN水平，评价运动性疲劳与机体代谢损伤水平[22-23]。

2 结果与讨论

2.1 OP中物质组成分析

不同品种OP中主要营养物质组成见图1。结果表明，不同品种的营养物质分布呈现明显的品种特异性，这种差异可能与品种遗传特性、栽培环境及果实成熟度等因素相关。从碳水化合物测定结果来看，所有品种均表现出高碳水化合物特征，其中‘皮瓜尔’中碳水化合物质量分数（68.16%）显著高于其他品种，而‘米扎’碳水化合物质量分数（59.74%）最低。表明碳水化合物作为油橄榄果实的主要储能物质，其积累水平存在明显的品种差异，可能与不同品种的光合效率或碳分配机制相关。另外，本研究测得的碳水化合物质量分数低于葡萄牙油橄榄果渣（84.90%）[24]，这种差异可能源于样品处理方式的不同，后者可能包含了果核和果皮等富含纤维的组织，导致碳水化合物检测结果偏高。水分测定结果显示，不同品种的水分代谢特征存在明显差异。这种差异可反映不同油橄榄品种对干旱胁迫的适应差异，以及果实发育过程中水分运输与利用效率的不同。各品种蛋白质质量分数整

体相对稳定，质量分数为9.05%~14.32%，其中‘米扎’的蛋白质质量分数（14.32%）最高，表明该品种的氮代谢活性更强。总脂肪测定结果表明，‘米扎’总脂肪质量分数为13.32%，油脂积累能力突出，与其油用品种的栽培特性相符；而‘戈达尔’总脂肪质量分数较低，这与其鲜食专用橄榄的育种方向相符。各品种灰分质量分数为2.39%~2.89%，整体波动较小。综上，本研究结果不仅证实了油橄榄果渣高碳水化合物的营养特征，同时明确了不同品种间存在显著的代谢差异。其中，‘皮瓜尔’具有高碳水化合物特点，表明其具有独特的碳同化调控机制。



同一指标不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 1　OP 中物质组成

Fig. 1　Chemical composition of OP

2.2　OP 提取物的抗氧化能力分析

β-胡萝卜素褪色测试结果见表1。‘戈达尔’的脂溶性抗氧化能力最优，这可能与其富含生育酚、类胡萝卜素等脂溶性抗氧化物质有关，这些成分可有效抑制脂质过氧化反应。$ABTS^+$自由基清除能力测试结果表明，‘戈达尔’的水溶性抗氧化活性最强，表明其可能富含多酚类等水溶性抗氧化成分。此外，‘戈达尔’同样表现出优异的DPPH自由基清除效果，该结果与β-胡萝卜素褪色测试结果一致，表明该品种可能含有多种具有广谱抗氧化活性的功能成分。

不同抗氧化评价体系的结果差异体现了抗氧化作用机制的复杂性。其中β-胡萝卜素褪色主要用于评估脂溶性体系的抗氧化能力，$ABTS^+$法更适用于检测水溶性成分的电子转移能力，而DPPH法则对氢原子供体类抗氧化剂更为敏感。‘戈达尔’在3种不同作用机制的抗氧化测试中均表现突出，表明其抗氧化成分可能具有多靶点、多途径的作用特性。该结果为深入理解不同油橄榄品种的抗氧化特性及其潜在应用价值提供了重要依据。

表 1　5 种 OP 提取物的抗氧化能力

Table 1　Antioxidant capacity of OP extracts of five olive varieties

品种	β-胡萝卜素褪色的 EC_{50}/（mg/mL）	$ABTS^+$自由基清除能力/（μmol/100 g）	DPPH 自由基清除能力的 IC_{50}/（mg/mL）
佛奥	19.08 ± 0.33^{c}	179.43 ± 0.78^{c}	34.09 ± 0.45^{c}
皮瓜尔	21.71 ± 0.87^{b}	159.82 ± 2.60^{d}	45.59 ± 0.25^{b}
科拉蒂那	28.37 ± 0.80^{a}	100.90 ± 3.05^{e}	65.21 ± 1.61^{a}
米扎	13.41 ± 0.53^{d}	326.73 ± 6.02^{b}	23.61 ± 0.57^{d}
戈达尔	10.25 ± 0.54^{e}	434.70 ± 9.94^{a}	21.38 ± 1.35^{e}

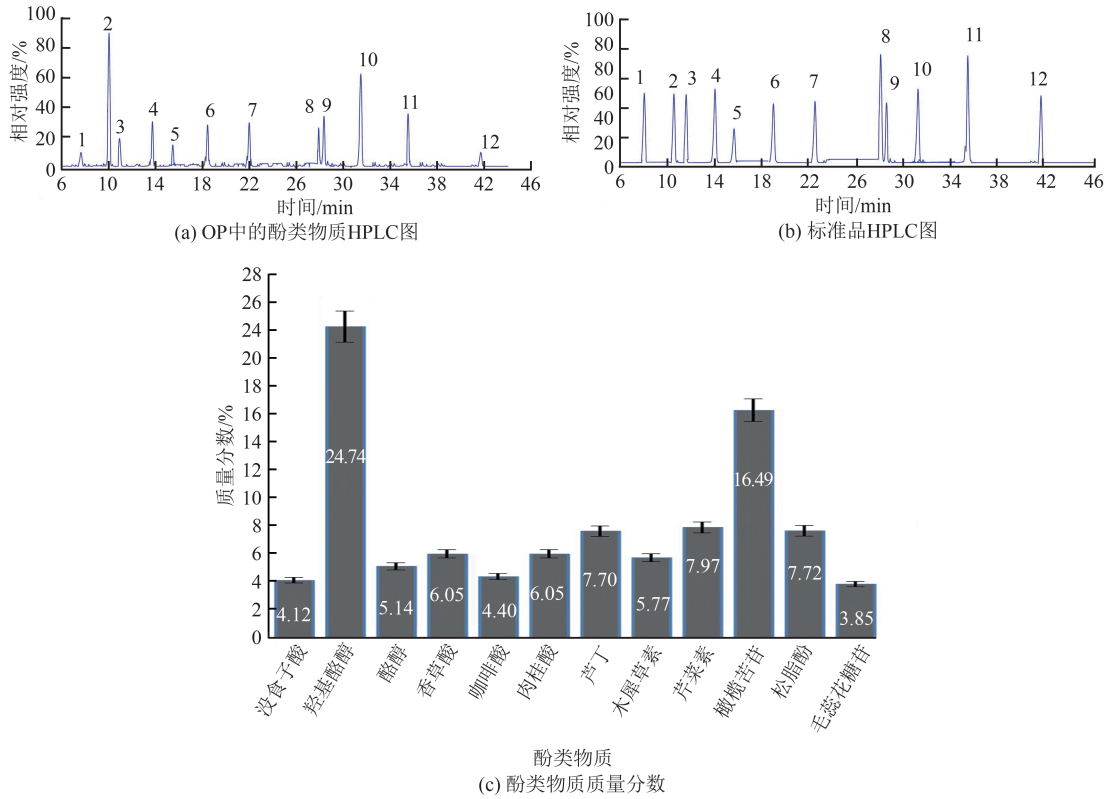
注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.3　OP 中酚类物质 HPLC 分离鉴定结果

在油橄榄加工过程中，酚类物质在各相间表现出明显的选择性分布特征。受酚类物质极性与化学结构差异的影响，其在油水两相中的分配存在明显不平衡现象：仅约2%的酚类物质进入油相，而98%的酚类物质（以羟基酪醇及其衍生物为主）留存在OP中[25]。这一分配特性表明，OP作为加工副产物仍具备优异的生物活性物质基础。在5个油橄榄品种OP中，‘戈达尔’品种果渣提取物的抗氧化活性最为突出。经HPLC鉴定后，从该品种果渣中鉴定出12种特征性酚类物质，且其酚类组分谱与已有文献报道的OP酚类成分基本一致[26]，见图2。

定量分析结果表明，‘戈达尔’果渣中各酚类物质质量分数存在明显的层级差异。其中羟基酪醇（24.74%）和橄榄苦苷（16.49%）作为优势酚类组分，占总酚质量的40%以上。这2种物质不仅是橄榄油特征风味的核心物质，也是其发挥健康功效的关键活性组分。其中，羟基酪醇作为地中海饮食中极具研究价值的功效成分，在‘戈达尔’果渣中的积

累最多，是其抗氧化活性显著优于其他品种的重要原因。芹菜素（7.97%）、松脂酚（7.72%）、芦丁（7.70%）、香草酸（6.05%）、肉桂酸（6.05%）、木犀草素（5.77%）和酪醇（5.14%）为中等质量分数组分，共同构成了果渣酚类物质的多样性体系。没食子酸（4.12%）和毛蕊花糖苷（3.85%）为微量组分，尽管占比相对较低，但其独特的化学结构可与其他酚类物质产生协同增效作用，进一步增强整体抗氧化活性。这种特征性的酚类组成模式不仅反映了‘戈达尔’品种的代谢特性，也从物质层面解释了其优异的抗氧化活性。其中，高质量分数的羟基酪醇与橄榄苦苷的组合，可能是该品种在多体系抗氧化评价中均表现突出的原因。该研究结果不仅为油橄榄加工副产物的高值化利用提供了重要的科学依据，也有效完善了农产品加工副产物资源化开发的研究体系[27]。



(a) OP中的酚类物质HPLC图　(b) 标准品HPLC图

酚类物质

(c) 酚类物质质量分数

1—没食子酸；2—羟基酪醇；3—酪醇；4—香草酸；5—咖啡酸；6—肉桂酸；7—芦丁；8—木犀草素；9—芹菜素；10—橄榄苦苷；11—松脂酚；12—毛蕊花糖苷。

图2　OP的酚类物质

Fig. 2　Phenolic compounds in OP

2.4　OP提取物对小鼠基础生理参数及力竭游泳时间的影响

通过为期28 d的动物试验，系统评估OP提取物对小鼠基础生理参数及运动耐力的影响。结果表明，OP提取物在测试剂量范围内具备良好的生物安全性。各剂量组小鼠体质量均呈正常的生理性增长，且组间差异无统计学意义，见表2。然而，随着OP提取物给药剂量的升高，小鼠摄食量与饮水量均呈下降趋势，表明OP提取物中多酚类物质对食欲调节存在潜在调控作用。各组小鼠体质量稳定增长，表明试验期间小鼠生理状态良好，为后续运动耐力测试的开展奠定了可靠的试验基础。

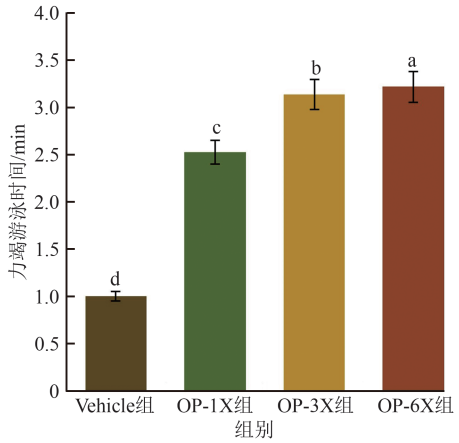
在运动耐力方面，OP提取物表现出显著的抗疲劳效果，见图3。与Vehicle组相比，OP-1X组小鼠的力竭游泳时间显著延长，较Vehicle组提升了130%，表明OP提取物在较低剂量下即可表现出良好的抗疲劳活性。OP-3X组小鼠运动耐力提升更为显著，力竭游泳时间较Vehicle组提升了

表 2　不同组别小鼠的基础生理参数

Table 2　Basic physiological parameters of mice in different groups

组别	初始体质量/g	最终体质量/g	摄食量/(g/d)	能量摄入量/(kJ/d)	饮水量/(mL/d)
Vehicle 组	39.4±0.6^{a}	41.4±0.6^{a}	7.8±0.1^{a}	98.4±1.6^{a}	11.0±0.1^{a}
OP-1X 组	39.5±0.3^{a}	41.4±0.7^{a}	7.8±0.1^{a}	98.4±1.6^{a}	10.6±0.3^{b}
OP-3X 组	39.6±0.9^{a}	41.4±1.1^{a}	7.5±0.1^{b}	94.6±1.6^{b}	10.8±0.3^{ab}
OP-6X 组	39.3±0.5^{a}	41.5±0.6^{a}	7.4±0.1^{b}	93.7±0.8^{b}	10.4±0.2^{b}

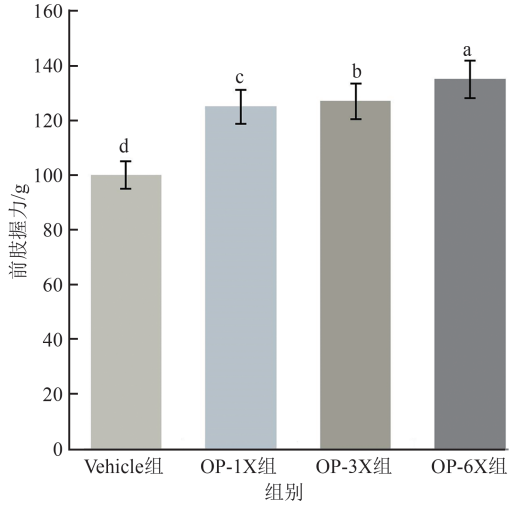
注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 3　OP 提取物对小鼠力竭游泳时间的影响

Fig. 3　Effects of OP extracts on exhaustive swimming time in mice



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 4　OP 提取物对小鼠前肢握力的影响

Fig. 4　Effects of OP extracts on forelimb grip strength in mice

200%；OP-6X 组的耐力表现最佳，较 Vehicle 组提升了 210%。该结果不仅证实了 OP 提取物的抗疲劳作用，还明确了其剂量-效应关系。OP 提取物的抗疲劳效果可能与其富含的羟基酪醇和橄榄苦苷等酚类物质的多种生物活性有关。具体作用机制可能包括 3 个方面：一是提升机体能量代谢效率；二是缓解运动引发的氧化应激损伤；三是提高肌肉组织的氧气利用效率。试验结果有效补充了林木源营养物质的抗疲劳作用研究，为油橄榄加工副产物在运动营养领域的开发与应用提供了重要的数据支撑[28]。

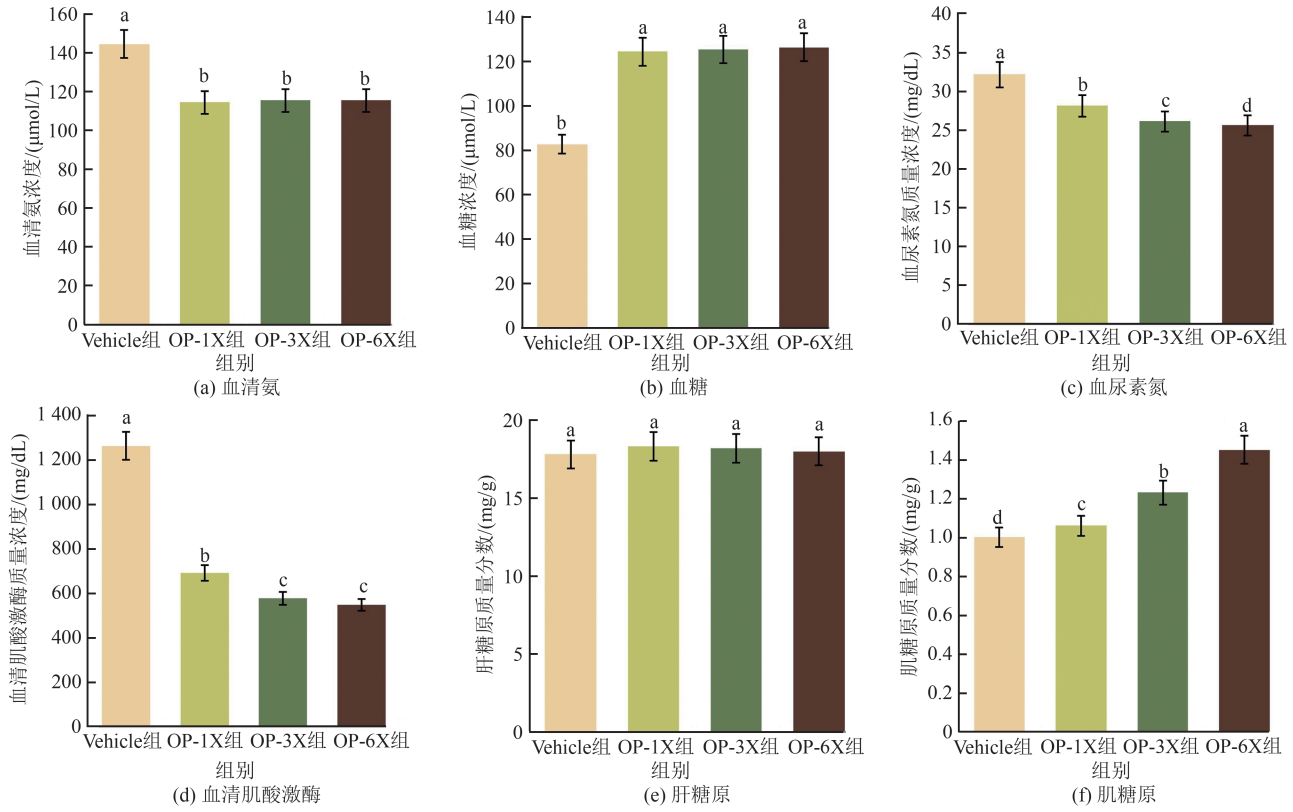
2.5　OP 提取物对小鼠前肢握力及生化参数的影响

作者通过 28 d 的干预试验评估了 OP 提取物对小鼠肌肉功能的改善作用，见图 4。OP 提取物显著增强了小鼠的前肢握力，且呈现明显的剂量依赖性。与 Vehicle 组相比，OP-1X、OP-3X 和 OP-6X 组的前肢握力增幅达 24%~35%，表明 OP 提取物不仅能够提升小鼠肢体的绝对力量，还能优化肌肉功能效率。结果表明，OP 提取物可能通过促进肌纤维合成、改善神经肌肉协调性来提升肌肉性能，其剂量依赖效应为后续优化 OP 提取物干预方案提供了重要依据。

小鼠力竭游泳后的血清生化指标见图 5。结果表明，OP 提取物可有效调控小鼠运动代谢水平。与 Vehicle 组相比，OP 各剂量组血清氨水平显著降低了 20%~21%，说明 OP 提取物可通过促进氨代谢、减少蛋白质分解来缓解运动性氨积累。同时，OP 组血糖水平较 Vehicle 组提高了 1.46~1.48 倍，表明 OP 提取物能有效维持运动后机体能量供给稳定。此外，与 Vehicle 组相比，OP 组血尿素氮水平降低了 15%~16%，血清肌酸激酶水平降低了 37%~45%，进一步证实 OP 提取物可显著减轻运动诱导的肌肉损伤，降低机体蛋白质代谢负荷。这些代谢改善效果同样呈剂量依赖特性，提示 OP 提取物可通过多靶点调控能量代谢通路，从而发挥抗疲劳作用。

各组小鼠肝糖原质量分数无显著差异，但各

OP组小鼠肌糖原储备较Vehicle组显著增加。其中，OP-6X组肌糖原质量分数较Vehicle组提高了45%，且呈现剂量依赖性增长。该结果与血糖水平升高相互印证，表明OP提取物可优先促进肌糖原合成，进而提高机体运动耐力。综上，OP提取物可通过多途径调控来改善运动代谢水平：通过降低氨和血尿素氮水平缓解机体代谢压力，通过维持稳定的血糖水平保障能量供给，同时通过提升肌糖原储备优化肌肉功能。这些机制共同发挥了OP提取物的抗疲劳和促运动恢复功效。本研究结果不仅为开发OP提取物运动营养补充剂提供了理论支持，也为林木特色活性物质抗疲劳机制研究提供了数据支撑[29]。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图5　OP提取物对小鼠生化参数的影响

Fig. 5　Effects of OP extracts on biochemical indicators in mice

2.6　组织病理学结果

作者通过HE染色对小鼠主要器官（肝脏、肌肉、心脏、肾脏和肺）进行组织病理学评估，见图6。结果显示，各剂量OP提取物干预均未造成小鼠主要器官组织结构异常。与Vehicle组相比，OP-1X、OP-3X和OP-6X组小鼠的所有受检器官均维持正常的组织形态，未出现炎性浸润、细胞变形、纤维化等病理损伤。这表明在试验剂量范围内，OP提取物不会对小鼠重要器官产生组织学毒性损伤，从组织学层面进一步验证了OP提取物具有良好的生物安全性。肝脏作为机体核心代谢器官，其组织结构完整、形态正常，表明该剂量下的OP提取物不会干扰药物代谢酶系统的正常功能。心肌与骨骼肌组织完整性排除了OP提取物对肌肉组织的潜在毒性影响。同时，肾脏与肺组织未见明显病理改变，提示小鼠机体排泄和呼吸功能未受OP提取物的影响。尽管OP提取物可显著提高肌糖原储备、改善机体运动代谢水平，但肌肉组织切片未观察到糖原异常沉积，说明OP提取物促进糖原合成的作用处于正常生理调控范围。综上，本研究结果为OP提取物在运动营养和功能食品领域的应用提供了可靠的安全性试验依据。

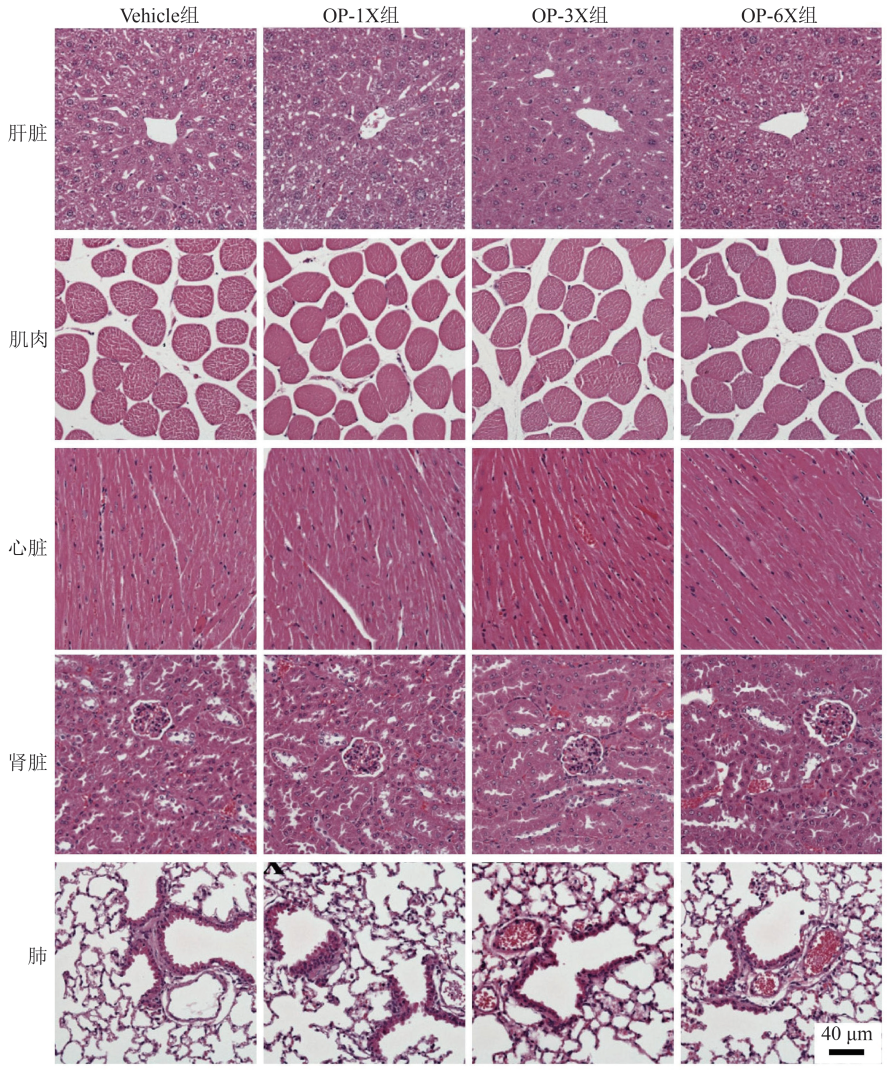


图 6　组织病理学结果

Fig. 6　Histopathology results

3　结论

油橄榄果渣提取物凭借其酚类物质的抗氧化活性显著改善了小鼠运动耐力。油橄榄果渣提取物可通过调控多项能量代谢关键指标发挥抗疲劳特性——降低血清氨、血糖和血尿素氮水平，同时抑制肌酸激酶活性。本研究明确了油橄榄果渣提取物在肌肉保护、代谢压力缓解、能量稳态调节 3 个方面的协同作用模式，为天然产物抗疲劳机制研究提供了多维度证据支撑。脏器组织病理学安全性评估结果证实，本研究所用剂量的油橄榄果渣提取物不会造成小鼠脏器组织损伤。结合其活性组分定量分析数据，为油橄榄加工副产物的高值化开发及抗疲劳功能食品的配方优化提供了理论依据。未来可以利用分子生物学技术揭示油橄榄果渣提取物对肌肉细胞信号通路的影响；此外，油橄榄果渣提取物中不同酚类物质的生物活性和协同效应也有待进一步研究，以优化油橄榄果渣提取物的组成并提高其健康效益。综上，本研究为油橄榄果渣资源的高值化利用提供了新思路，也为开发天然抗疲劳食品补充剂提供了科学依据。

参考文献

[1] ROMERO C，MEDINA E，MATEO M A，et al. New by-products rich in bioactive substances from the olive oil mill processing[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2018，98(1)：225-230.

[2] 李虹佳，张安宁，范斯琴，等. 油橄榄副产物的营养价值

及其在猪生产中的应用研究进展[J]. 动物营养学报，2024，36(7)：4116-4125.
LI H J，ZHANG A N，FAN S Q，et al. Research progress on nutritional value of olive by-products and their application in pig production [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2024，36(7)：4116-4125.(in Chinese)

[3] 姜永生，张谖，付玉杰. 刺梨果渣中5种有效成分提取工艺优化[J]. 东北林业大学学报，2024，52(9)：115-122，131.
JIANG Y S，ZHANG S，FU Y J. Optimization of the extraction process for five active components from *Rosa roxburghii* pomace [J]. Journal of Northeast Forestry University，2024，52(9)：115-122，131.(in Chinese)

[4] 鲍佳益，于心雨，祝梅斐，等. 蜂胶酚类化合物缓解高脂饮食诱导非酒精性脂肪性肝病的作用效果及机制研究进展[J]. 食品科学，2024，45(19)：332-341.
BAO J Y，YU X Y，ZHU M F，et al. Research progress in the effect and mechanism of *Propolis* polyphenols in alleviating high fat diet-induced non-alcoholic fatty liver disease [J]. Food Science，2024，45(19)：332-341.(in Chinese)

[5] 寇鸿千，秦彤，刘明，等. 多酚调控动物肠道健康的作用机制及植物多酚在猪生产中的应用研究进展[J]. 动物营养学报，2024，36(4)：2104-2117.
KOU H Q，QIN T，LIU M，et al. Research progress on mechanism of polyphenols regulating animal intestinal health and application of plant polyphenols in pig production [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2024，36(4)：2104-2117.(in Chinese)

[6] 池玉闽，董怡，何强，等. 油橄榄果不同部位主要营养成分及抗氧化能力[J]. 中国调味品，2023，48(3)：51-56.
CHI Y M，DONG Y，HE Q，et al. Main nutrients and antioxidant capacity of different parts of olive fruit [J]. China Condiment，2023，48(3)：51-56.(in Chinese)

[7] DAMMAK I，NEVES M，ISODA H，et al. Recovery of polyphenols from olive mill wastewater using drowning-out crystallization based separation process[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2016，34：326-335.

[8] DE LOS ÁNGELES FERNÁNDEZ M，ESPINO M，GOMEZ F J V，et al. Novel approaches mediated by tailor-made green solvents for the extraction of phenolic compounds from agro-food industrial by-products [J]. Food Chemistry，2018，239：671-678.

[9] GALANAKIS C M，TORNBERG E，GEKAS V. Recovery and preservation of phenols from olive waste in ethanolic extracts[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology，2010，85(8)：1148-1155.

[10] 韦良开，张安宁，李瑞，等. 油橄榄果渣的营养与功能特性及其在畜禽生产中的应用研究进展[J]. 动物营养学报，2024，36(1)：1-11.
WEI L K，ZHANG A N，LI R，et al. Research progress in nutritional and functional characteristics of olive pomace and its application in livestock and poultry production[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2024，36(1)：1-11.(in Chinese)

[11] 谢林志，刘杰，金孟达，等. 油橄榄副产物提取物的生理功能及其在家禽生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志，2024，60(11)：47-53.
XIE L Z，LIU J，JIN M D，et al. Physiological functions of extracts from olive by-products and their application in poultry production [J]. Chinese Journal of Animal Science，2024，60(11)：47-53.(in Chinese)

[12] 李梦民，刘滔，罗婷，等. 疲劳评价与食源性抗运动疲劳成分研究进展[J]. 食品工业科技，2025，46(2)：394-402.
LI M M，LIU T，LUO T，et al. Research progress of fatigue evaluation and foodborne anti-sport fatigue components [J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(2)：394-402.(in Chinese)

[13] 杨沅君，祁小术，张冬冬，等. 疲劳性亚健康对小鼠机械痛敏和热痛敏的影响[J]. 中国药理学通报，2019，35(3)：387-390.
YANG Y J，QI X S，ZHANG D D，et al. Effects of fatigue-predominant subhealth on mechanical and thermal pain sensitivity in mice [J]. Chinese Pharmacological Bulletin，2019，35(3)：387-390.(in Chinese)

[14] ZHAO H F，SHEN C，WU Z J，et al. Comparison of wheat，soybean，rice，and pea protein properties for effective applications in food products [J]. Journal of Food Biochemistry，2020，44(4)：e13157.

[15] DE BRUNO A，ROMEO R，FEDELE F L，et al. Antioxidant activity shown by olive pomace extracts[J]. Journal of Environmental Science and Health，Part B，2018，53(8)：526-533.

[16] XU C M，YAGIZ Y，ZHAO L，et al. Fruit quality，nutraceutical and antimicrobial properties of 58 muscadine grape varieties (*Vitis rotundifolia* Michx.) grown in United States[J]. Food Chemistry，2017，215：149-156.

[17] SINROD A J G，AVENA-BUSTILLOS R J，OLSON D A，et al. Phenolics and antioxidant capacity of pitted olive pomace affected by three drying technologies [J]. Journal of Food Science，2019，84(3)：412-420.

[18] BRAND-WILLIAMS W，CUVELIER M E，BERSET C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity [J]. LWT-Food Science and Technology，1995，28(1)：25-30.

[19] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1999, 26(9/10): 1231-1237.

[20] CONFORTI F, STATTI G A, TUNDIS R, et al. *In vitro* activities of *Citrus medica* L. cv. Diamante (Diamante citron) relevant to treatment of diabetes and Alzheimer's disease[J]. Phytotherapy Research, 2007, 21(5): 427-433.

[21] KAN N W, HO C S, CHIU Y S, et al. Effects of resveratrol supplementation and exercise training on exercise performance in middle-aged mice [J]. Molecules, 2016, 21(5): 661.

[22] HUANG C C, HSU M C, HUANG W C, et al. Triterpenoid-rich extract from *Antrodia camphorata* improves physical fatigue and exercise performance in mice [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2012, 2012(1): 364741.

[23] WU R E, HUANG W C, LIAO C C, et al. Resveratrol protects against physical fatigue and improves exercise performance in mice[J]. Molecules, 2013, 18(4): 4689-4702.

[24] ANTÓNIA NUNES M, COSTA A S G, BESSADA S, et al. Olive pomace as a valuable source of bioactive compounds: a study regarding its lipid- and water-soluble components[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 229-236.

[25] CHANIOTI S, TZIA C. Optimization of ultrasound-assisted extraction of oil from olive pomace using response surface technology: oil recovery, unsaponifiable matter, total phenol content and antioxidant activity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 178-189.

[26] MALAPERT A, REBOUL E, LOONIS M, et al. Direct and rapid profiling of biophenols in olive pomace by UHPLC-DAD-MS[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(4): 1001-1010.

[27] 高净乐,顾璐萍,常翠华,等. 蛋黄中免疫球蛋白提取副产物的综合利用研究[J]. 食品与生物技术学报,2023, 42(10): 73-82.
GAO J L, GU L P, CHANG C H, et al. Comprehensive utilization of by-products from immunoglobulin extraction in egg yolk [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(10): 73-82.(in Chinese)

[28] 余梅,焦迎春. 柴达木大肥菇多糖的体内外抗氧化活性研究[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(12): 101-109.
YU M, JIAO Y C. Study on *in vivo* and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (quél.) sacc[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(12): 101-109.(in Chinese)

[29] 周立稳,彭效明,居瑞军,等. 不同溶剂对枇杷果提取物抗氧化活性和多酚稳定性的影响[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(9): 107-115.
ZHOU L W, PENG X M, JU R J, et al. Effect of different solvents on the antioxidant activity and polyphenol stability of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) fruit extract[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(9): 107-115.(in Chinese)