DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.16.020

山苏活性物质超声辅助酶解提取工艺优化及其体内功能活性

赵永俊[1],苏若芳[2],杨军[2],张爱玲[2],任晓锋[1,3*],申利鹏[1]
(1. 江苏大学 食品与生物工程学院,江苏 镇江 212013;2. 中科智谷国际医药生物科技(广东)有限公司,广东 清远 511538;3. 江苏大学 食品物理加工研究院,江苏 镇江 212013)

摘　要:为提高山苏的利用价值,该试验采用超声辅助酶解提取工艺提取山苏粉,以蛋白质含量为指标,通过单因素试验分析超声频率、功率密度、超声时间和酶解条件等因素对山苏提取效果的影响,并探究其对 2 型糖尿病小鼠的降血糖、降血脂及降尿酸功效。结果表明,最佳工艺条件为超声频率 20 kHz、功率密度 1 950 W/L、超声时间 10 min,并使用纤维素酶和果胶酶进行酶解,酶质量比为 1∶1、酶浓度为 20 U/mL、pH4.5、酶解温度 50 ℃、酶解时间 60 min。该工艺下山苏粉的蛋白质含量和可溶性膳食纤维含量提高。与模型对照组相比,高剂量组(500 mg/kg)使糖尿病小鼠空腹血糖降低 49.1%,总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇水平分别降低了 55.8%、21.6% 和 28.0%,尿酸水平降低了 33.4%。
关键词:山苏;超声辅助提取;糖尿病;降血糖;降尿酸;降血脂

Optimization of Ultrasonic-Assisted Enzymatic Extraction Process of Active Substances from *Asplenium nidus* and Its *in vivo* Functional Activities

ZHAO Yongjun[1], SU Ruofang[2], YANG Jun[2], ZHANG Ailing[2], REN Xiaofeng[1,3*], SHEN Lipeng[1]
(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. Zhongke Zhigu International Pharmaceutical Biotechnology (Guangdong) Co., Ltd., Qingyuan 511538, Guangdong, China; 3. Institute of Food Physical Processing, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the utilization value of *Asplenium nidus*, this study adopted an ultrasonic-assisted method to prepare *A. nidus* powder. Taking protein content as the evaluation index, single-factor experiments were carried out to analyze the effects of ultrasonic frequency, power density, ultrasonic time and enzymatic hydrolysis conditions on the extraction efficiency of *A. nidus*. Meanwhile, the hypoglycemic, hypolipidemic and uric acid-lowering activities of the obtained powder were investigated in type 2 diabetic mice. The results showed that the optimal technological conditions were determined as follows: ultrasonic frequency of 20 kHz, power density of 1 950 W/L, ultrasonic time of 10 min, compound enzymolysis with cellulase and pectinase at the mass ratio of 1∶1, enzyme concentration of 20 U/mL, pH value of 4.5, enzymolysis temperature of 50 ℃, and enzymolysis time of 60 min. Under the optimized conditions, the protein content and soluble dietary fiber content of *A. nidus* powder were effectively increased. Compared with the model control group, the high dose of *A. nidus* powder (500 mg/kg) reduced the fasting blood glucose of diabetic mice by 49.1%. The levels of total cholesterol, triglyceride and low-density lipoprotein cholesterol were decreased by 55.8%, 21.6% and 28.0%, respectively, and the serum uric acid level was reduced by 33.4%.
Key words: *Asplenium nidus*; ultrasonic-assisted extraction; type 2 diabetes mellitus; hypoglycemic effect; hypolipidemic effect; hypouricemic effect

引文格式:
赵永俊,苏若芳,杨军,等 . 山苏活性物质超声辅助酶解提取工艺优化及其体内功能活性[J]. 食品研究与开发,2026,47(16):158-164.

作者简介:赵永俊(2000—),男(汉),硕士研究生,研究方向:食品物理加工技术。
*通信作者:任晓锋(1980—),男(汉),教授,博士,研究方向:食品物理加工技术与智能装备。

ZHAO Yongjun, SU Ruofang, YANG Jun, et al. Optimization of Ultrasonic-Assisted Enzymatic Extraction Process of Active Substances from *Asplenium nidus* and Its *in vivo* Functional Activities[J]. Food Research and Development, 2026, 47(16): 158-164.

山苏为蕨类植物又名鸟巢蕨(*Asplenium nidus*),属铁角蕨科(Aspleniaceae),巢蕨属(*Neottopteris* J. Sm.),为多年生大型附生植物,其叶片向上斜展,密集呈鸟巢状,故得名鸟巢蕨[1]。研究表明,山苏的营养成分较全面,营养成分构成合理,富含人体必需的多种氨基酸、矿物质、微量元素、维生素等[2]。尤其是维生素A、钙等含量较高[3]。因山苏兼具优良的营养价值与功能活性,成为一种符合现代营养学要求、兼具保健功效的野生蔬菜[4]。

糖尿病(diabetes mellitus, DM)是一类常见的内分泌代谢紊乱性疾病,由胰岛素分泌相对不足或胰岛素抵抗引发糖脂代谢异常所致[5]。临床以高血糖为主要特征,典型患者表现为多尿、多饮、多食及体重减轻,即"三多一少"症状[6]。随着人们生活水平的提升,糖尿病已成为严重的公共健康问题。目前,糖尿病的治疗方式主要包括饮食干预和药物治疗[7],但药物治疗在缓解症状的同时易产生多种不良反应,且停药后易复发,给患者带来较大负担[8]。植物天然活性成分具有多途径、多靶点、不良反应小、协同效应强和可综合调节等特点[9]。因此,从天然植物中筛选具有降血糖、降尿酸功效的活性物质已成为药学领域的研究热点[10]。从植物中提取天然降血糖、降尿酸成分替代人工合成同类物质,可有效提高用药安全性,减少毒副作用[11]。

植物活性成分是指构成植物体的各种物质,从植物中提取此类生物活性成分,在生物工程、制药工程和食品加工等领域具有重要应用价值[12]。传统的热提取技术如索氏提取、水提取、蒸汽蒸馏提取等,已被广泛应用于植物生物活性化合物的提取[13-14]。近年来,新兴提取技术的发展激增,例如超声辅助提取、微波辅助提取和超临界液体提取[15]。这些尖端的技术旨在通过提供缩短提取时间、降低溶剂消耗、提高提取率和提高提取质量等优点,解决传统方法的局限性[16]。超声处理作为一种物理加工方式,可通过空化效应和机械作用破坏植物组织结构,有效地提高植物提取物中生物活性成分含量。杨雯雯等[17]通过响应面试验法优化了超声波辅助提取桑叶蛋白的工艺。Bian等[18]采用多频逆流超声处理提高脱脂桑籽蛋白的提取率,并验证了其对抗氧化活性的提高作用。Yang等[19]采用超声辅助酶解技术提高藜麦蛋白提取量并改变其功能特性。

超声可以使得山苏的植物细胞壁破裂,促进细胞中的生物活性物质释放。虽然超声波技术已广泛应用于成分提取领域,关于超声辅助提取山苏粉的研究和山苏提取物对2型糖尿病的降血糖以及降尿酸、降血脂等生理功效方面的研究鲜见报道。因此,本研究将采用超声辅助提取的加工方式来制备山苏粉,研究超声辅助技术对山苏粉的蛋白质和膳食纤维的影响。在此基础上,建立2型糖尿病小鼠模型,进一步研究山苏粉作为功能性食品的体内调节血糖代谢、降尿酸功效,以期为山苏的深度开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜山苏叶:中科智谷国际医药生物科技(广东)有限公司;链脲佐菌素(streptozotocin, STZ)(生物级)、纤维素酶(10 U/mg)、果胶酶(50 U/mg):上海麦克林生化科技有限公司;XTC01WC-001普通饲料、XTHF60高脂饲料:江苏省协同医药生物工程有限责任公司;甘油三酯(triacylglycerol, TG)测定试剂盒、总胆固醇(total cholesterol, TC)测定试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)测定试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)测定试剂盒、尿酸(uric acid, UA)测定试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;氯化钠、柠檬酸、柠檬酸钠、无水乙醇、考马斯亮蓝G-250(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

数显恒温水浴锅(HH-4):常州市金坛友联仪器有限公司;高速破壁机(L18-Y928S):九阳股份有限公司;旋转蒸发仪(LC-RE-5299):上海力辰邦西仪器科技有限公司;真空冷冻干燥机(SCIENTZ-10N):宁波新芝生物科技股份有限公司;台式低温离心机(H1850R):湖南湘仪实验仪器开发有限公司;聚能式超声波设备(WKS100-2):江苏江大五棵松生物科技有限公司;酶标仪(M200):瑞士Tecan集团公司;紫外可见分光光度计(T6):北京普析通用仪器有限责任公司;稳捷血糖仪(稳悦智佳):莱弗仕康(上海)医疗器材有限公司。

1.3 实验动物

雄性ICR小鼠:江苏大学动物实验中心,48只,体质量(body weight, BW)(20±5) g,4~6周龄,生产许可证:SCXK(苏)2023-0017,于无特定病原体(specific pathogen free, SPF)环境下喂养。

1.4　方法

1.4.1　山苏预处理

取鲜山苏叶洗净，沥干水分，于 80 ℃ NaCl 溶液（1%）中漂烫 2 min，进行杀青处理。杀青后清水洗净，晾干水分后备用。称取山苏叶置于破壁机中，按料液比 1∶4（g/mL）加入蒸馏水，充分破碎制得山苏匀浆液。

1.4.2　超声辅助提取山苏活性物质

量取山苏匀浆液，采用聚能式超声波设备进行超声辅助提取，提取结束后经纱布过滤，滤液备用，滤渣经酶解后再次过滤，合并两次滤液，经旋蒸浓缩后冻干，制得山苏叶提取物干粉备用。

1.4.3　单因素试验设计

以蛋白质含量为评价指标，优化超声处理参数。其中超声频率设置为 20、28、40 kHz；超声时间设置为 0、5、10、15、20 min；功率密度设置为 0、650、1 300、1 950、2 600、3 250、3 900 W/L；以蛋白质含量为指标优化酶解条件，对比超声、酶解后超声、超声后酶解和对滤渣酶解 4 种处理方法，确定超声波辅助提取和酶解的最佳工艺参数；以可溶性膳食纤维含量为指标优化超声辅助酶解条件，对比纤维素酶酶解、蛋白酶酶解、超声辅助纤维素酶酶解和超声辅助蛋白酶酶解 4 种处理方法，确定超声辅助酶解工艺。

1.4.4　蛋白质含量的测定

参考 Zhang 等[20]的方法采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量。考马斯亮蓝 G-250 在稀酸溶液中与蛋白质结合后变为蓝色，其蓝色蛋白质染料复合物在 595 nm 波长下的吸光度与蛋白质含量成正比，绘制标准曲线，得到吸光度（Y）与蛋白质含量（X）的标准曲线方程：Y=1.015 9X+0.168 4（R^2=0.996），根据标准曲线计算出样品中蛋白质含量。

1.4.5　可溶性膳食纤维含量的测定

可溶性膳食纤维含量参考 GB 5009.88—2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》测定。

1.4.6　小鼠 2 型糖尿病模型的建立与分组

参考 Liu 等[21]的方法并作稍作修改。48 只小鼠适应性饲养 1 周后，随机分为空白组和造模组，空白组给予普通饲料，造模组给予高脂饲料。饲养 4 周后，造模组小鼠按 35 mg/kg BW，连续 3 d 一次性左下腹腔注射由柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液（pH4.4）配制的 0.5% STZ 溶液，并继续高脂饲料喂养；空白组的小鼠注射等剂量的柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液，继续普通饲料喂养。2 型糖尿病模型构建成功标准参考邓捷等[22]的方法，72 h 后，剪尾取血使用血糖仪测定空腹血糖，大于 11.1 mmol/L 即为造模成功。将造模成功的小鼠，随机分成 3 组：模型对照组、山苏提取物低剂量组（250 mg/kg）和山苏提取物高剂量组（500 mg/kg）。每天上午用药组小鼠按 0.005 mL/g BW 灌服药物，空白组和模型对照组小鼠灌服等量生理盐水。实验前将分组的小鼠打上耳标进行分组标号，在实验期间各组小鼠自由饮水。

1.4.7　小鼠体质量、血糖及血清指标的测定

参照 Chang 等[23]的方法，每周固定时间称量小鼠体质量。小鼠禁食不禁水 6 h 后，通过剪尾采血法测定各组小鼠的空腹血糖（fasting blood glucose，FBG）。每周 1 次，连续 4 周。4 周给药结束后摘除眼球并取血，将全血于 1.5 mL 离心管中常温静置 30 min 后，4 ℃、3 000 r/min 离心 15 min，取上清液即为血清，−80 ℃保存备用。取血后，颈椎脱臼处死小鼠。血清样品中 TC、TG、LDL-C、HDL-C 和 UA 水平采用相应的试剂盒进行测定。

1.5　数据处理

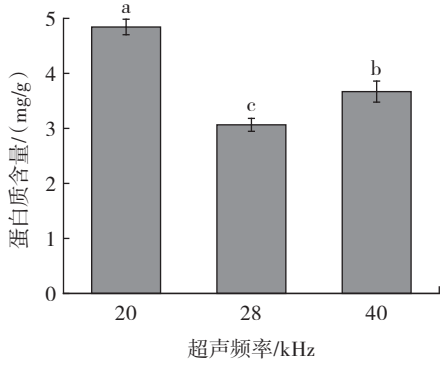
每组试验至少重复 3 次，结果用平均值±标准差表示；用 SPSS 26 软件进行数据分析；用 Origin 2017 软件作图。

2　结果与分析

2.1　单因素试验结果

2.1.1　超声频率对蛋白质含量的影响

超声频率是影响提取过程中空化效应的一个关键参数，适宜的超声频率能有效提高生物活性物质提取率[24]。不同超声频率对山苏提取物蛋白质含量的影响见图 1。



不同小写字母表示差异显著，P<0.05。

图 1　超声频率对山苏提取物蛋白质含量的影响

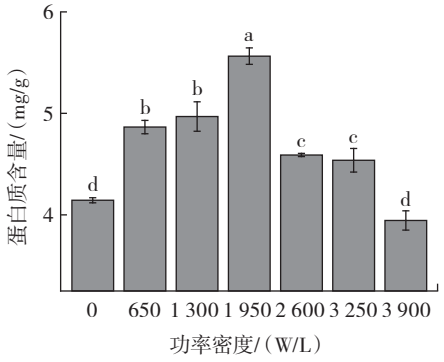
Fig.1　Effect of different ultrasound frequencies on protein content of *Asplenium nidus* extract

由图 1 可知，超声频率为 20 kHz 处理的蛋白质含量最高（4.844 mg/g），显著高于超声频率 28、40 kHz（P<0.05），因此，选用超声频率为 20 kHz 进行后续试验。

2.1.2　功率密度对蛋白质含量的影响

功率密度对山苏提取物蛋白质含量的影响见图 2。

由图 2 可知，蛋白质含量随着功率密度的增加呈现先上升后下降的趋势，当功率密度为 1 950 W/L 时，超声提取效果最佳，蛋白质含量（5.564 mg/g）相比未超声处理的显著提高（P<0.05），且随着功率密度的继续



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

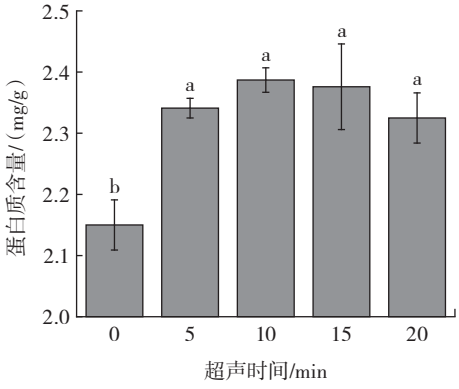
图 2　不同超声功率密度对山苏提取物蛋白质含量的影响

Fig.2　Effect of ultrasonic power density on protein content of *Asplenium nidus* extract

增加，蛋白质含量出现降低趋势，可能由于功率密度过大，引起空化作用增强，蛋白结构遭到破坏，导致蛋白质含量降低[25]。综上，选择功率密度为 1 950 W/L 进行后续试验。

2.1.3　超声时间对蛋白质含量的影响

超声时间对山苏提取物蛋白质含量的影响见图 3。



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

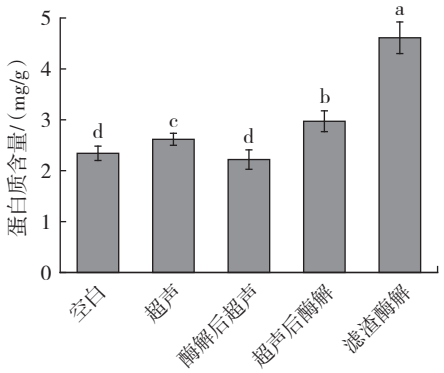
图 3　不同超声时间对山苏提取物蛋白质含量的影响

Fig.3　Effect of different ultrasound time on protein content of *Asplenium nidus* extract

由图 3 可知，随着超声时间的延长，蛋白质含量同样呈先增加后下降的趋势，当超声时间为 10 min 时，超声效果最佳，蛋白质含量最高，且继续延长超声时间后，蛋白质含量出现下降趋势，这可能是因为长时间的超声作用对山苏的蛋白质产生了破坏，从而降低了蛋白质含量[26]。综上，选择超声时间为 10 min 进行后续试验。

2.1.4　超声辅助酶解工艺对蛋白质含量的影响

蛋白质分子的可及性是影响植物细胞中蛋白质提取效率的关键因素。因此，破坏植物细胞壁并添加特定试剂，已成为提升蛋白质提取效率的关键步骤[27]。根据单因素优化出最佳超声工艺条件：功率密度 1 950 W/L、超声频率 20 kHz、超声时间 10 min。使用纤维素酶和果胶酶进行酶解，酶质量比为 1∶1、酶浓度为 20 U/mL、pH4.5、酶解温度 50 ℃、酶解时间 60 min，对比超声与酶解工艺方式对山苏提取物蛋白质含量的影响，结果见图 4。



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

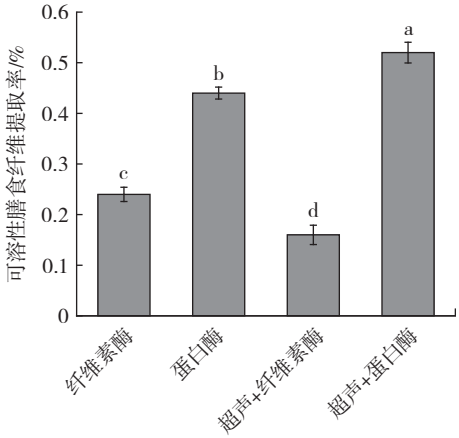
图 4　不同超声辅助酶解工艺对山苏提取物蛋白质含量的影响

Fig.4　Effect of different ultrasound-assisted enzymatic processes on protein content of *Asplenium nidus* extract

由图 4 可知，超声后对提取液进行过滤处理，收集滤液。对滤渣进行酶解，过滤收集滤液。合并两次滤液，所得到的提取液的蛋白质含量（4.617 2 mg/g）显著高于其他处理方法（$P<0.05$）。因此，选择先超声处理后滤渣酶解的处理方式进行后续试验。

2.2　超声辅助酶解工艺对可溶性膳食纤维含量的影响

超声波和酶解处理会影响山苏中生物活性物质的释放和溶解，促进蛋白质提取的同时也会改善其他生物活性物质的提取[28]。超声与酶解处理对山苏提取物可溶性膳食纤维含量的影响见图 5。



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

图 5　不同超声辅助酶解工艺对山苏提取物可溶性膳食纤维含量的影响

Fig.5　Effect of different ultrasound-assisted enzymatic processes on the soluble dietary fiber content of *Asplenium nidus* extract

由图 5 可知，不同超声和酶解处理对提取物可溶性膳食纤维含量影响差异显著。未超声处理时，蛋白酶酶解后可溶性膳食纤维含量高于纤维素酶酶解。结

合超声处理时，纤维素酶酶解得到的可溶性膳食纤维含量下降，而通过超声辅助蛋白酶酶解得到的可溶性膳食纤维含量显著高于其他处理方式（P<0.05），达到 0.52%。综上，选择超声联合蛋白酶酶解工艺继续后续试验。

2.3　山苏提取物对糖尿病小鼠体质量的影响

山苏提取物对小鼠体质量的影响见图 6。

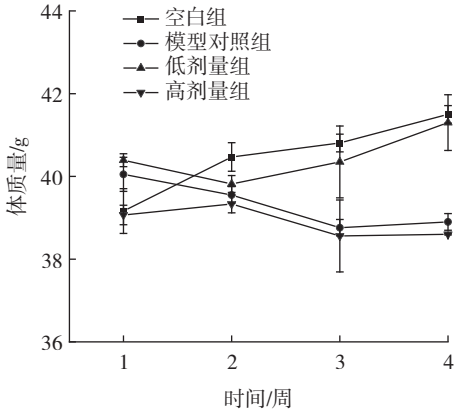


图 6　山苏提取物对小鼠体质量的影响

Fig.6　Effect of the extract of *Asplenium nidus* on the body weight of mice

由图 6 可知，空白组、模型对照组、低剂量组、高剂量组的第 4 周体质量分别为 41.6、38.9、41.5、38.6 g。与空白组相比，模型对照组小鼠体质量降低，且呈持续下降趋势。饲养 4 周后空白组和低剂量组小鼠的体质量高于模型对照组和高剂量组，说明山苏叶提取物低剂量处理可有效抑制小鼠体质量的下降。

2.4　山苏提取物对糖尿病小鼠空腹血糖的影响

山苏提取物对小鼠空腹血糖（FBG）的影响见图 7。

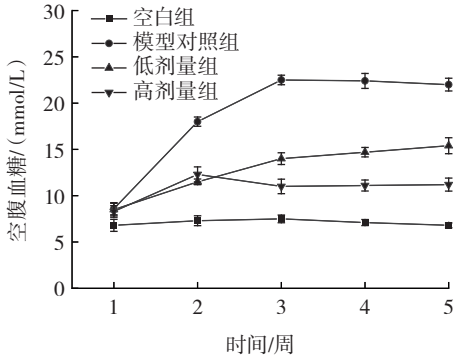


图 7　山苏提取物对小鼠空腹血糖的影响

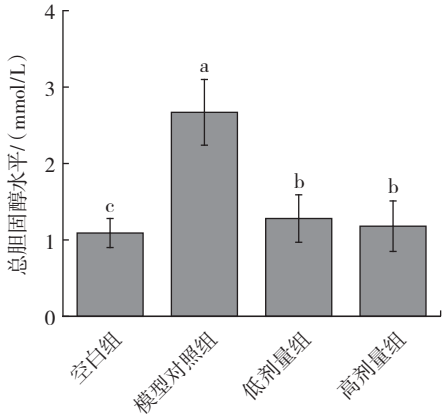
Fig.7　Effect of the extract of *Asplenium nidus* on FBG of mice

由图 7 可知，空白组小鼠的 FBG 较稳定，造模组经 STZ 诱导后成功建立 2 型糖尿病模型（FBG> 11.1 mmol/L）。从第 3 周开始，高剂量组小鼠的 FBG 出现下降，低剂量组小鼠的 FBG 虽未降低，但其 FBG 仍低于模型对照组。4 周后测定空白组、模型对照组、低剂量组、高剂量组的 FBG 分别为 6.8、22.0、15.4、11.2 mmol/L。说明山苏提取液可以有效改善小鼠的血糖代谢，与模型对照组相比低剂量组（250 mg/kg）FBG 降低 30%，高剂量组（500 mg/kg）降血糖效果更好，降低 49.1%。

2.5　山苏提取物对血清指标的影响

2.5.1　山苏提取物对总胆固醇水平的影响

山苏提取物对小鼠总胆固醇水平的影响见图 8。



不同小写字母表示差异显著，P<0.05。

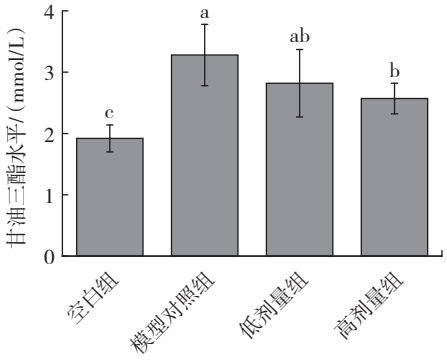
图 8　山苏提取物对小鼠总胆固醇水平的影响

Fig.8　Effect of the extract of *Asplenium nidus* on TC levels of mice

由图 8 可知，与空白组相比，模型对照组小鼠总胆固醇水平显著增加（P<0.05）。经山苏提取物干预后，与模型对照组相比，低剂量组总胆固醇水平显著降低了 52.1%（P<0.05），高剂量组总胆固醇水平显著降低了 55.8%（P<0.05）。说明山苏提取物可以有效地降低糖尿病小鼠的总胆固醇水平，改善其胆固醇的代谢。

2.5.2　山苏提取物对甘油三酯水平的影响

山苏提取物对小鼠甘油三酯水平的影响见图 9。



不同小写字母表示差异显著，P<0.05。

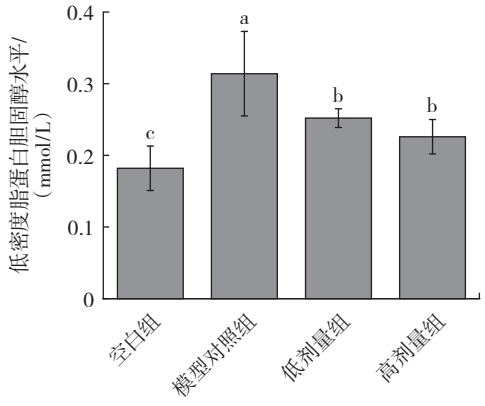
图 9　山苏提取物对小鼠甘油三酯水平的影响

Fig.9　Effect of the extract of *Asplenium nidus* on TG levels of mice

由图 9 可知，与空白组相比，模型对照组小鼠甘油三酯水平显著增加 70.8%（P<0.05）。经山苏提取物干预后，与模型对照组相比，低剂量组甘油三酯水平明显降低 14.0%，高剂量组甘油三酯水平显著降低 21.6%（P<0.05）。说明山苏提取物可以有效地降低糖尿病小鼠的甘油三酯水平，改善其甘油三酯的代谢。

2.5.3 山苏提取物对低密度脂蛋白胆固醇水平的影响

山苏提取物对小鼠低密度脂蛋白胆固醇水平的影响见图 10。



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

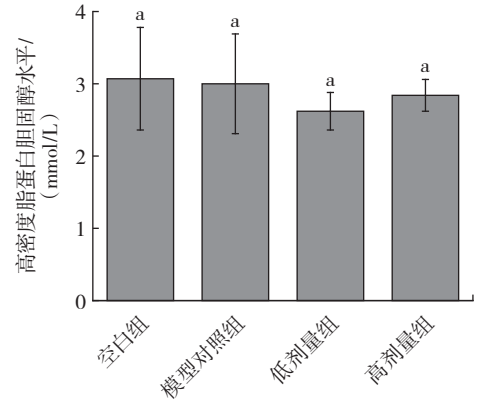
图 10 山苏提取物对小鼠低密度脂蛋白胆固醇水平的影响

Fig.10 Effect of the extract of *Asplenium nidus* on LDL-C levels of mice

由图 10 可知，与空白组相比，模型对照组小鼠低密度脂蛋白胆固醇水平显著增加 72.5%（$P<0.05$）。经山苏提取物干预后，与模型对照组相比，低剂量组低密度脂蛋白胆固醇水平显著降低 19.7%（$P<0.05$），高剂量组低密度脂蛋白胆固醇水平显著降低 28.0%（$P<0.05$）。说明山苏提取物可以有效地降低糖尿病小鼠的低密度脂蛋白胆固醇水平。

2.5.4 山苏提取物对高密度脂蛋白胆固醇水平的影响

山苏提取物对小鼠高密度脂蛋白胆固醇水平的影响见图 11。



相同小写字母表示差异不显著，$P>0.05$。

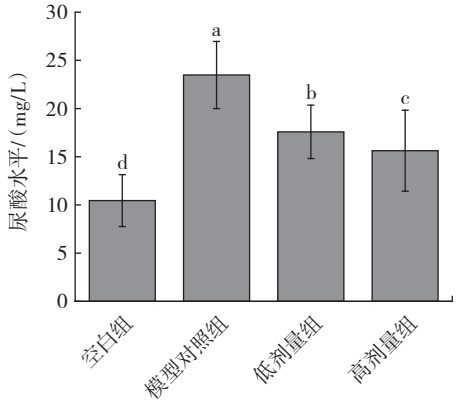
图 11 山苏提取物对小鼠高密度脂蛋白胆固醇水平的影响

Fig.11 Effect of the extract of *Asplenium nidus* on HDL-C levels of mice

由图 11 可知，与空白组相比，模型对照组和高、低剂量组小鼠高密度脂蛋白胆固醇水平无显著变化（$P>0.05$）。但可以观察到高、低剂量组小鼠的高密度脂蛋白胆固醇水平与模型对照组相比出现降低趋势，但差异不显著，可能是因为灌胃剂量不足。

2.5.5 山苏提取物对尿酸水平的影响

山苏提取物对小鼠尿酸水平的影响见图 12。



不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

图 12 山苏提取物对小鼠尿酸水平的影响

Fig.12 Effect of the extract of *Asplenium nidus* on UA levels of mice

由图 12 可知，与空白组相比，模型对照组小鼠尿酸水平显著增加（$P<0.05$）。经山苏提取物干预后，与模型对照组相比，低剂量组尿酸水平显著降低 25.1%（$P<0.05$），高剂量组尿酸水平显著降低 33.4%（$P<0.05$）。说明山苏提取物可以有效地降低糖尿病小鼠的尿酸水平，改善其尿酸代谢功能。

3 结论

本试验采用超声辅助酶解提取山苏生物活性物质，通过单因素试验，对超声波辅助提取工艺进行优化，得到最佳工艺条件：超声频率 20 kHz、功率密度 1 950 W/L、超声时间 10 min，在此最佳工艺条件下，山苏提取物蛋白质含量为 5.564 mg/g。并采用超声联合蛋白酶酶解工艺，先超声后酶解，通过对超声后提取液的滤渣进行酶解，提取液蛋白质含量达到 4.617 2 mg/g。通过建立小鼠糖尿病模型，验证山苏提取物在体内的生物活性。实验结果表明：山苏提取物能改善糖尿病小鼠体质量的降低症状，降低空腹血糖水平；与模型对照组相比，能够明显降低小鼠血清中 UA、TG、TC 和 LDL-C 的水平，且高剂量组会表现出更加显著的效果，说明山苏提取物可以在调节糖尿病小鼠相关代谢紊乱方面发挥作用。本研究结果为山苏作为功能性食品或代餐产品的开发提供科学依据。

参考文献：

[1] 刘慧清, 吴巨贤, 陈海彬, 等 . HS-SPME-GC-MS 法分析英红九号与山苏共发酵茶的香气成分[J]. 食品安全导刊, 2021(31): 80-83. LIU Huiqing, WU Juxian, CHEN Haibin, et al. Analysis of aroma compounds in yinghong No.9 fermented with *Asplenium nidus* by HS-SPME-GC-MS[J]. China Food Safety Magazine, 2021(31): 80-83.

[2] VORONKOV A S, IVANOVA T V. Fatty acids composition of the epiphytic ferns, *Platycerium bifurcatum* and *Asplenium nidus*, and the terrestrial fern, *Asplenium trichomanes*[J]. American Fern Journal, 2021, 111(2): 117-128.

[3] 徐诗涛, 陈秋波, 宋希强, 等 . 新型食用蔬菜鸟巢蕨嫩叶营养成分检测[J]. 热带作物学报, 2012, 33(8): 1487-1493.
XU Shitao, CHEN Qiubo, SONG Xiqiang, et al. Nutritional evaluation of *Asplenium nidus* L. leaves from Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(8): 1487-1493.

[4] 徐诗涛, 张俊芳, 钟云芳, 等 . 巢蕨属植物的生态与资源价值研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(27): 13446-13448.
XU Shitao, ZHANG Junfang, ZHONG Yunfang, et al. Study on ecological and resource values of *Neottopteris* plants[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(27): 13446-13448.

[5] DICKEN S J, DAHM C C, IBSEN D B, et al. Food consumption by degree of food processing and risk of type 2 diabetes mellitus: A prospective cohort analysis of the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC)[J]. The Lancet Regional Health-Europe, 2024, 46: 101043.

[6] TU J, LIU G H, CAO X T, et al. Hypoglycemic effects of wheat bran alkyresorcinols in high-fat/high-sucrose diet and low-dose streptozotocin-induced type 2 diabetic male mice and protection of pancreatic β cells[J]. Food & Function, 2019, 10(6): 3282-3290.

[7] KHOO J, RAYNER C K, JONES K L, et al. Incretin-based therapies: New treatments for type 2 diabetes in the new millennium[J]. Therapeutics and Clinical Risk Management, 2009, 5: 683-698.

[8] SANCHEZ-RANGEL E, INZUCCHI S E. Metformin: Clinical use in type 2 diabetes[J]. Diabetologia, 2017, 60(9): 1586-1593.

[9] ZHENG H Z, CHANG T Y, PENG B, et al. Chinese patent medicine as a complementary and alternative therapy for type 2 diabetes mellitus: A scoping review[J]. Complementary Therapies in Medicine, 2024, 80: 103014.

[10] CHEMAT F, VIAN M A, RAVI H K, et al. Review of alternative solvents for green extraction of food and natural products: Panorama, principles, applications and prospects[J]. Molecules, 2019, 24(16): 3007.

[11] BO S, DAN M, LI W, et al. The regulatory mechanism of natural polysaccharides in type 2 diabetes mellitus treatment[J]. Drug Discovery Today, 2024, 29(11): 104182.

[12] AKYÜZ A, TEKIN İ, AKSOY Z, et al. Plant protein resources, novel extraction and precipitation methods: A review[J]. Journal of Food Process Engineering, 2024, 47(10): e14758.

[13] GIL-MARTÍN E, FORBES-HERNÁNDEZ T, ROMERO A, et al. Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 131918.

[14] KUMAR M, TOMAR M, POTKULE J, et al. Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106595.

[15] LIU Y, SHI Y J, ZOU J B, et al. Extraction, purification, structural features, biological activities, modifications, and applications from *Taraxacum mongolicum* polysaccharides: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129193.

[16] CĂLINESCU I, VINATORU M, GHIMPEȚEANU D, et al. A new reactor for process intensification involving the simultaneous application of adjustable ultrasound and microwave radiation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105701.

[17] 杨雯雯, 李轲, 王婷婷, 等 . 桑叶蛋白超声波辅助提取工艺优化及其氨基酸组分分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(18): 106-113.
YANG Wenwen, LI Ke, WANG Tingting, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process of mulberry leaf protein and analysis of its amino acid composition[J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 106-113.

[18] BIAN Y R, LI W J, PAN L H, et al. Sweet-flavored peptides with biological activities from mulberry seed protein treated by multifrequency countercurrent ultrasonic technology[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130647.

[19] YANG C, LIU W Y, ZHU X J, et al. Ultrasound-assisted enzymatic digestion for efficient extraction of proteins from quinoa[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 194: 115784.

[20] ZHANG L, WANG X, HU Y, et al. Dual-frequency multi-angle ultrasonic processing technology and its real-time monitoring on physicochemical properties of raw soymilk and soybean protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 80: 105803.

[21] LIU X Y, MA Q Y, FENG Y X, et al. Potato resistant starch improves type 2 diabetes by regulating inflammation, glucose and lipid metabolism and intestinal microbial environment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281(Pt 1): 136389.

[22] 邓捷, 付香玉, 赵德强, 等 . 石斛多糖对小鼠体内血糖、血脂浓度、免疫功能及抗疲劳能力的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 88-95.
DENG Jie, FU Xiangyu, ZHAO Deqiang, et al. Effects of *Dendrobium* polysaccharides on blood glucose and blood lipid concentration, immune function, and anti-fatigue ability in mice[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 88-95.

[23] CHANG R R, LIU J, JI F F, et al. Hypoglycemic effect of recrystallized resistant starch on high-fat diet-and streptozotocin-induced type 2 diabetic mice *via* gut microbiota modulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129812.

[24] XU B G, FENG M, TILIWA E S, et al. Multi-frequency power ultrasound green extraction of polyphenols from Pingyin rose: Optimization using the response surface methodology and exploration of the underlying mechanism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 156: 113037.

[25] KOBUS Z, KRZYWICKA M, PECYNA A, et al. Process efficiency and energy consumption during the ultrasound-assisted extraction of bioactive substances from hawthorn berries[J]. Energies, 2021, 14(22): 7638.

[26] RANJHA M M A N, IRFAN S, LORENZO J M, et al. Sonication, a potential technique for extraction of phytoconstituents: A systematic review[J]. Processes, 2021, 9(8): 1406.

[27] GÖRGÜÇ A, BIRCAN C, YILMAZ F M. Sesame bran as an unexploited by-product: Effect of enzyme and ultrasound-assisted extraction on the recovery of protein and antioxidant compounds[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 637-645.

[28] YU P L, PAN X Y, CHEN M J, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of soluble dietary fiber from *Hericium erinaceus* and its *in vitro* lipid-lowering effect[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101657.

加工编辑:刘艳美
收稿日期:2025-04-22