

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.08.019

灵芝多糖真空耦合超声提取工艺优化及其 抗帕金森病活性研究

朱蔓蕾¹, 李强明¹, 吴淑珍¹, 王 成², 彭 灿³, 罗建平¹

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 霍山县天下泽雨生物科技发展有限公司, 安徽 六安 237200; 3. 安徽中医药大学 药学院, 安徽 合肥 230012)

摘 要: 为了提高灵芝多糖的提取率, 并评价其抗帕金森病(Parkinson's disease, PD)活性, 文章通过单因素实验和正交试验优化灵芝多糖的真空耦合超声提取工艺, 并采用 1-甲基-4-苯基-1,2,3,6-四氢吡啶(MPTP)诱导的 PD 小鼠模型评价灵芝多糖的抗 PD 活性。结果表明: 灵芝多糖真空耦合超声提取的最佳工艺条件为超声时间 120 min、超声温度 50 ℃、超声功率 300 W、料液比 1:30; 在该条件下, 灵芝多糖提取率为 2.16%, 与超声辅助提取法相比, 灵芝多糖提取率提高了 52.11%。体内抗 PD 活性实验结果显示, 灵芝多糖可显著改善 PD 小鼠的运动功能障碍, 并可抑制多巴胺能神经元变性死亡。研究结果表明, 真空耦合超声提取法能显著提高灵芝多糖的提取率, 且灵芝多糖具有显著的抗 PD 活性。

关键词: 灵芝; 多糖; 真空耦合超声提取法; 抗帕金森病(PD)活性; 工艺优化

中图分类号: R284.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2026)08-1135-06

Study on vacuum-coupled ultrasonic extraction optimization and anti-Parkinson's disease activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharides

ZHU Manlei¹, LI Qiangming¹, WU Shuzhen¹, WANG Cheng², PENG Can³, LUO Jianping¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Huoshan County Tianxia Zeyu Biotechnology Development Co., Ltd., Lu'an 237200, China; 3. School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China)

Abstract: To enhance the extraction yield of *Ganoderma lucidum* polysaccharides, and to evaluate their anti-Parkinson's disease(PD) activity, vacuum-coupled ultrasonic extraction conditions of *G. lucidum* polysaccharides were optimized by single factor test and orthogonal test, and the anti-PD activity of *G. lucidum* polysaccharides was evaluated in 1-methyl-4-phenyl-1,2,3,6-tetrahydropyridine(MPTP) induced PD mouse model. The optimal extraction conditions were as follows: ultrasonic time of 120 min, ultrasonic temperature of 50 ℃, ultrasonic power of 300 W, and solid-liquid ratio of 1:30. Under these conditions, the extraction yield of *G. lucidum* polysaccharides was 2.16%. Compared with ultrasound-assisted extraction, the extraction yield of *G. lucidum* polysaccharides was enhanced by 52.11% via vacuum-coupled ultrasonic extraction. The *in vivo* anti-PD activity evaluations demonstrated that *G. lucidum* polysaccharides could significantly improve the motor dysfunction and inhibit the dopaminergic neuron loss of PD mice. These results prove that vacuum-coupled ultrasonic extraction can be used to enhance the extraction yield of *G. lucidum* polysaccharides, and *G. lucidum* polysaccharides exhibit significant anti-PD activity.

收稿日期: 2024-04-03; **修回日期:** 2024-04-23

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目(201903a07020020)

作者简介: 朱蔓蕾(1999—), 女, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生;

李强明(1989—), 男, 江西鹰潭人, 博士, 合肥工业大学副教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: liqm-2010@163.com;

罗建平(1966—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

Key words: *Ganoderma lucidum*; polysaccharides; vacuum-coupled ultrasonic extraction; anti-Parkinson's disease(PD) activity; process optimization

0 引言

灵芝(*Ganoderma lucidum*)为多孔菌科真菌赤芝或紫芝的干燥子实体,是一味具有补气安神、扶正固本功效的传统名贵药材^[1-3]。研究显示,灵芝含有众多的生物活性物质,包括多糖、三萜、甾醇、生物碱、核苷、氨基酸和多肽等^[4],其中多糖被认为是灵芝的主要生物活性物质。

近年来,关于灵芝多糖提取工艺及药理作用的研究一直广受关注,目前已报道的提取方法包括热水浸提法^[5]、超声辅助法^[6]、微波提取法^[7]、酶提取法^[8]等,但关于灵芝多糖真空耦合超声提取工艺优化的相关报道较少。真空耦合超声提取法是一种通过真空创造低压条件并耦合超声以实现低成本、低耗能、高效率的提取方法,与超声辅助法等常规提取方法相比,具有稳定、可靠、节能、省时等优点,可用于工业大规模提取^[9]。因此本文对真空耦合超声提取灵芝多糖工艺的优化进行了研究。

研究显示,灵芝多糖具有免疫调节、降血脂、降血糖、改善微循环和抗氧化等多种生物活性^[10-13]。然而,目前有关灵芝多糖是否有抗帕金森病(Parkinson's disease, PD)活性的研究较少。结合灵芝多糖补气安神的功效,本文采用 1-甲基-4-苯基-1,2,3,6-四氢吡啶(MPTP)诱导的 PD 小鼠模型对灵芝多糖的抗帕金森病活性进行了评价研究。

1 材料与仪器

1.1 材料

本实验所用材料有:灵芝子实体(霍山县天下泽雨生物科技发展有限公司);SPF 级 C57BL/6 雄性小鼠(8 周龄,23~25 g,常州卡文斯实验动物有限公司);MPTP(上海碧云天生物技术有限公司);葡萄糖、苯酚、浓硫酸、1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)、95%乙醇、多聚甲醛、氯化钠、羟甲基纤维素钠(CMC-Na)、左旋多巴、蒸馏水、水合氯醛(国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器

本文所用仪器有:AL104 电子天平(梅特勒-托利多有限公司);V-5000 型可见分光光度计(上海元析有限公司);KQ-300DE 型数控超声波清洗

器(昆山市仪器有限公司);GM-0.33A 隔膜真空泵(天津市津腾实验设备有限公司);KW-6C 疲劳转棒仪(卡尔文生物科技有限公司);HH 数显恒温水浴锅(常州国宇仪器制造有限公司)。

2 实验方法

2.1 灵芝多糖质量浓度的检测

2.1.1 硫酸苯酚检测法

参考文献[14]的方法,以葡萄糖标准溶液为对照品,在 490 nm 处测定吸光度,以吸光度为纵坐标、葡萄糖浓度为横坐标绘制标准曲线,其线性回归方程为 $Y=18.036X-0.0125$, $R^2=0.997$ 。

2.1.2 供试样品中多糖质量浓度的测定

精密量取供试样品溶液 0.5 mL,置于 5 mL 离心管中,按照标准曲线制备项下的方法,自“补加蒸馏水至 1 mL”起,依照相同方法操作,测定吸光度,并且根据标准曲线计算出多糖质量浓度。灵芝多糖提取率 Y 计算公式如下:

$$Y = \frac{\rho V}{m} \times 100\%,$$

其中: ρ 为供试品溶液质量浓度; V 为滤液体积; m 为灵芝子实体粉末质量。

2.2 单因素实验

使用超微粉碎机将灵芝子实体粉碎并过 200 目筛得到超微粉,经 95%乙醇浸泡多次直至浸泡液颜色无明显差异,滤渣烘干(60 °C)至恒重后留取备用;准确称取 3 g 灵芝粉置于锥形瓶中,开启真空泵形成负压,通过二通阀调节真空度为 0.08 MPa,固定加入 30 mL 蒸馏水于锥形瓶中,在 300 W、30 °C 下超声提取 120 min,分别考察不同超声功率(180、210、240、270、300 W)、不同料液比(1:10、1:15、1:20、1:25、1:30)、不同超声温度(20、30、40、50、60 °C)、不同超声时间(60、90、120、150、180 min)对灵芝多糖提取率的影响。提取结束后,离心、过滤,收集滤液置 100 mL 容量瓶中,定容,即得供试样品,按 2.1.2 节所述方法测定多糖质量浓度。

2.3 正交试验设计

参考文献[15-16]的方法,根据上述得到的单因素实验结果,选取每个单因素中的最佳提取条件,设计四因素三水平正交试验,正交试验因素及水平见表 1 所列。

表 1 正交试验因素水平表

水平	A 超声时间/min	B 超声温度/℃	C 料液比	D 超声功率/W
1	120	40	1:25	240
2	150	50	1:30	270
3	180	60	1:35	300

2.4 灵芝多糖的制备

根据文献[17]报道的方法对灵芝水提物进行纯化以获得灵芝多糖。

2.5 PD 小鼠模型的建立

选取 5 只(每组随机分配 1 只)状态良好的小鼠进行分组,具体如下:正常组(Control)、模型组(Model)、阳性药(75 mg/(kg·d))组(L-DO-PA)、灵芝多糖低剂量(100 mg/(kg·d))组(GLP-L)、灵芝多糖高剂量(200 mg/(kg·d))组(GLP-H)。模型组、阳性药组、灵芝多糖高、低剂量组均采用 MPTP (30 mg/(kg·d))进行造模,同时正常组注射生理盐水,连续腹腔注射 7 d。注射 MPTP 造模前连续 3 d 对所有小鼠进行行为学实验。阳性药组、灵芝多糖高、低剂量组连续 14 d 灌胃相应药物,其余组则给予生理盐水。末次给药后进行转棒实验、悬挂实验等行为学测试。最后用 CO₂ 处死小鼠后取黑质致密部、纹状体,石蜡包埋并切片,进行小鼠黑质致密部的 Nissl 染色、酪氨酸羟化酶(tyrosine hydroxylase, TH)免疫组织化学染色及纹状体的 TH 免疫组织化学染色检测[18-20]。

2.6 图像分析及数据处理

使用 Image-pro Plus 软件统计小鼠脑组织中的神经元数目[21-23]。使用 Graph-Pad 软件进行显著性分析,图中所用数据以平均值±标准差表示。采用 One-way ANOVA 单因素方差分析和多重比较分析 2 种方法进行显著性分析,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。与正常组相比, # 表示 $P < 0.05$, ## 表示 $P < 0.01$;与模型组相比, * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 结果与分析

3.1 单因素实验结果与分析

3.1.1 料液比对灵芝多糖提取率的影响

料液比对灵芝多糖提取率的影响如图 1 所示。由图 1 可知,在料液比从 1:15 变化到 1:35 时,灵芝多糖的提取率呈现先上升后下降的趋势,在料液比为 1:30 的情况下提取率达到峰值。这是由于多糖溶液被稀释导致其浓度降低,从而

影响醇沉程度[24-25]。因此选择 1:30 作为最佳料液比。

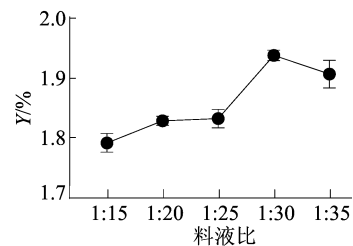


图 1 料液比对灵芝多糖提取率的影响

3.1.2 超声温度对灵芝多糖提取率的影响

超声温度对灵芝多糖提取率的影响如图 2 所示。由图 2 可知,超声温度在 20~60 ℃ 时,灵芝多糖的提取率呈现先显著上升后又缓慢下降的趋势,在温度为 50 ℃ 时达到最大值。这可能是由于多糖结构被温度破坏导致生物活性降低[26-27]。因此选择 50 ℃ 为最佳超声温度。

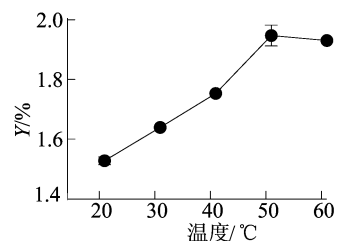


图 2 超声温度对灵芝多糖提取率的影响

3.1.3 超声功率对灵芝多糖提取率的影响

超声功率对灵芝多糖提取率的影响如图 3 所示。由图 3 可知,在超声功率为 180~300 W 的范围内,灵芝多糖提取率呈现先逐渐上升又缓慢下降的趋势,功率为 270 W 时达到最大值。这可能是由于超声功率过大破坏了多糖结构[28]。因此选择 270 W 为最佳超声功率。

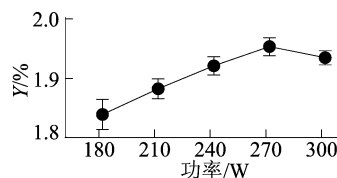


图 3 超声功率对灵芝多糖提取率的影响

3.1.4 超声时间对灵芝多糖提取率的影响

超声时间对灵芝多糖提取率的影响如图 4 所示。由图 4 可知,在超声时间为 60~180 min 的范围内,灵芝多糖的提取率逐渐升高,在 150 min 以前增长速度较快,之后趋于稳定,变化不显著。

在超声时间 150 min 时多糖已经较好溶出,再延长提取时间会增加能耗及成本,并促进杂质溶出,由此导致后续多糖纯化难度和成本提高^[29-30]。综合考虑可选择 150 min 作为最佳超声时间。

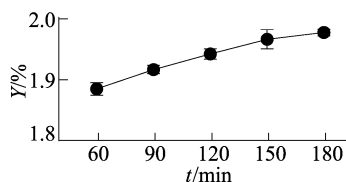


图 4 超声时间对灵芝多糖提取率的影响

3.2 正交试验设计与结果分析

以单因素实验结果为基础,以灵芝多糖提取率作为考察指标,本文设计的 $L_9(3^4)$ 正交试验及结果见表 2 所列。

表 2 正交试验设计及结果

试验号	A	B	C	D	Y/%
1	1	1	1	1	1.884±0.025
2	1	2	2	2	1.940±0.007
3	1	3	3	3	1.888±0.011
4	2	1	2	3	1.918±0.010
5	2	2	3	1	1.912±0.020
6	2	3	1	2	1.872±0.006
7	3	1	3	2	1.826±0.192
8	3	2	1	3	1.884±0.015
9	3	3	2	1	1.892±0.005
K_1	5.714	5.628	5.64	5.688	
K_2	5.702	5.738	5.752	5.640	
K_3	5.620	5.646	5.626	5.690	
k_1	1.905	1.876	1.880	1.896	
k_2	1.901	1.913	1.917	1.880	
k_3	1.873	1.882	1.875	1.897	
R	0.094	0.110	0.126	0.050	

由表 2 可知,各因素对灵芝多糖提取率的影响程度从大到小依次为 C、B、A、D,即料液比是影响灵芝多糖提取率的最主要因素,其次依次是超声温度、超声时间和超声功率。由此得到最佳工艺条件为 $A_1B_2C_2D_3$,即超声时间 120 min、超声温度 50 ℃、料液比 1:30、超声功率 300 W。

根据正交试验结果,对此工艺组合进行 5 次平行试验,结果取其平均值,可得最终提取率为 $(2.16 \pm 0.05)\%$,大于表 2 中提取率的最大值 $(1.940 \pm 0.007)\%$,表明正交试验优化得到的结果更加可靠。

3.3 对比实验

超声辅助提取法是提取灵芝多糖的常用方

法^[31],为了验证真空耦合超声提取法在提取灵芝多糖过程中是否具有优势,本文对真空耦合超声提取法与超声辅助法进行了比较。本研究采用文献^[31]中超声辅助法提取灵芝多糖的最佳工艺参数,得出灵芝多糖提取率为 $(1.42 \pm 0.02)\%$,采用真空耦合超声提取法可将灵芝多糖提取率提高至 $(2.16 \pm 0.05)\%$,灵芝多糖提取率提高了 52.11%,证明真空耦合超声提取法在灵芝多糖提取方面具有优势。

3.4 小鼠行为学实验结果分析

转棒实验和悬挂实验结果如图 5 所示。

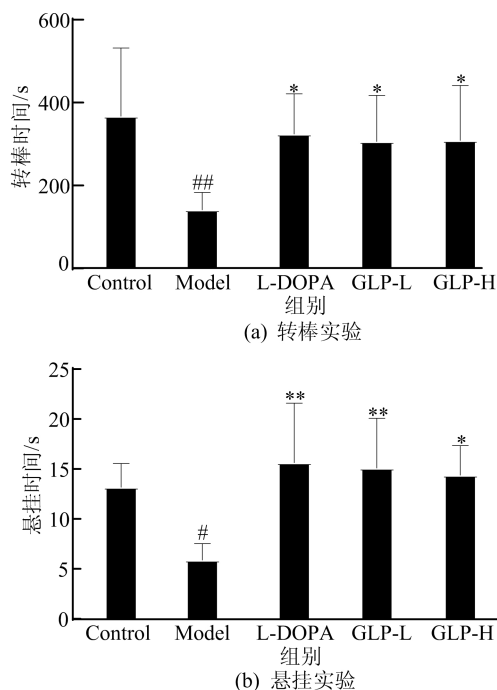


图 5 转棒实验和悬挂实验结果

由图 5a 可知:与 Control 组小鼠相比,Model 组小鼠由于帕金森病引起的功能障碍使其在转棒上停留时间显著降低;GLP-L 组、GLP-H 组小鼠与 Model 组小鼠相比,在转棒上停留时间则显著增加。由图 5b 可知:Model 组小鼠同样由于运动功能障碍比 Control 组小鼠的悬挂时间显著降低;与 Model 组小鼠相比,GLP-L 组、GLP-H 组小鼠悬挂时间则显著增加。据此可知,灵芝多糖可显著改善 PD 小鼠运动功能障碍,且表现出显著的抗 PD 活性。

3.5 小鼠脑组织检测结果分析

小鼠脑组织染色图及其分析如图 6 和图 7 所示。Nissl 染色结果显示:与 Control 组小鼠相比,Model 组小鼠黑质致密部 Nissl 阳性细胞显

著减少且排列不连续、杂乱;而 GLP-L 组、GLP-H 组小鼠与 Model 组小鼠相比,Nissl 阳性细胞显著增多且排列连续,证明灵芝多糖可显著抑制 PD 小鼠黑质致密部多巴胺能神经元变性死亡。小鼠黑质致密部 TH 免疫组学结果显示:与 Control 组小鼠相比,Model 组小鼠黑质致密部 TH 阳性细胞显著减少,而灵芝多糖低剂量及高剂量干预后均可显著增加 PD 小鼠黑质致密部 TH 阳性细胞,进一步证明灵芝多糖可显

著抑制 PD 小鼠黑质致密部多巴胺能神经元变性死亡。小鼠纹状体 TH 免疫组化结果显示。与 Control 组小鼠相比,Model 组小鼠纹状体 TH 阳性纤维显著减少,GLP-L 组、GLP-H 组小鼠纹状体 TH 阳性纤维显著多于 Model 组小鼠,再次证明灵芝多糖可显著抑制 PD 小鼠黑质致密部多巴胺能神经元变性死亡。综上可知,灵芝多糖可通过抑制多巴胺能神经元变性死亡而发挥抗 PD 活性作用。

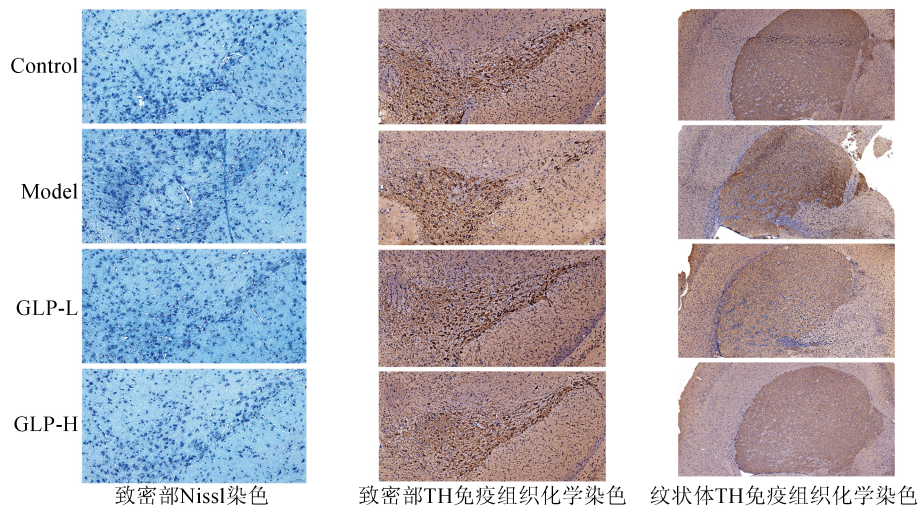


图 6 小鼠脑组织染色图

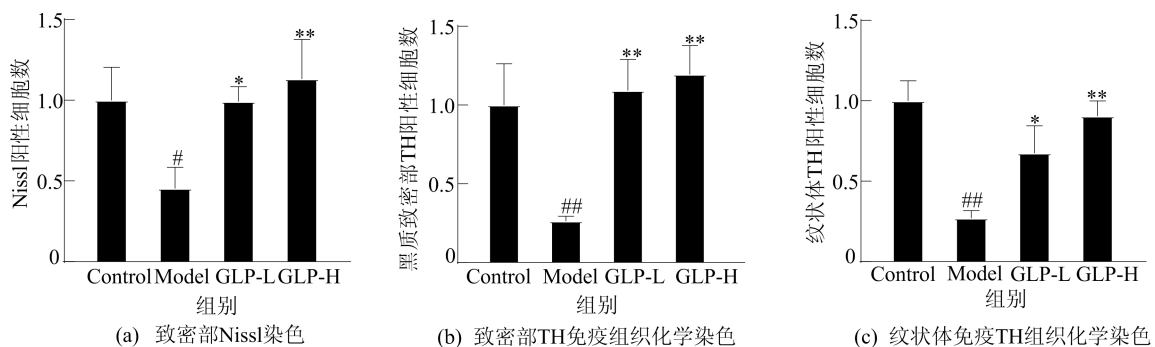


图 7 小鼠脑组织染色结果分析

4 结 论

本研究对灵芝多糖的真空耦合超声提取工艺进行了优化,在真空度为 0.08 MPa 下真空耦合超声提取灵芝多糖的最佳提取工艺参数为超声时间 120 min、超声温度 50 ℃、料液比 1:30、超声功率 300 W,该条件下灵芝多糖提取率为 $(2.16 \pm 0.05)\%$,与常规超声辅助提取法相比,灵芝多糖提取率提高了 52.11%,证明真空耦合超声提取法能显著提高灵芝多糖的提取率。此外,本文对灵芝多糖的活性进行研究,发现灵芝多糖可显著

改善 MPTP 诱导的 PD 小鼠的运动功能障碍,抑制多巴胺能神经元变性死亡,表现出显著的抗 PD 活性。本研究为高效、低能耗提取灵芝多糖提供了新思路,并为其后续开发及应用奠定了基础。

[参 考 文 献]

- [1] 李晓冰,赵宏艳,郭栋. 灵芝多糖药理学研究进展[J]. 中成药,2012,34(2):332-335.
- [2] 田淑雨,鹿士峰,吴杨洋,等. 超声破碎辅助提取灵芝多糖工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发,2019,40(8):101-107.

- [3] Huang S Q, Ning Z X. Extraction of polysaccharide from *Ganoderma lucidum* and its immune enhancement activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(3): 336-341.
- [4] 侯廷花, 杨锦颖, 杨星星, 等. 响应面法优化灵芝孢子粉药渣多糖提取工艺[J]. 时珍国医国药, 2020, 31(1): 199-202.
- [5] 吴杨洋, 周妍汝, 刘春燕, 等. 灵芝多糖提取工艺优化及抗氧化活性的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(14): 4636-4642.
- [6] 李凤林, 吕艳荣, 宫敬利, 等. 灵芝多糖超声波提取工艺条件的优化[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(3): 640-643.
- [7] 张妙彬, 潘丽晶, 陈继敏, 等. 灵芝多糖的微波法提取及抗氧化活性研究[J]. 中国食用菌, 2013, 32(4): 35-37.
- [8] 吕兴萍, 杨薇红, 马春娇. 响应面优化酶法提取灵芝多糖工艺条件[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(6): 258-260.
- [9] 李颜桃, 仲崇华, 张健荣, 等. 沙棘籽多酚超声耦合真空提取工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(11): 151-156.
- [10] Yang X, Zhang R, Yao J, et al. *Ganoderma lucidum* Polysaccharide enhanced the antitumor effects of 5-Fluorouracil against gastric cancer through its Upregulation of NKG2D/MICA [J]. International Journal of Polymer Science, 2019, 2019(4): 1-7.
- [11] Xu Y, Zhang X, Yan X H, et al. Characterization, hypolipidemic and antioxidant activities of degraded polysaccharides from *Ganoderma lucidum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 706-716.
- [12] Wang J, Cao B, Zhao H, et al. Emerging roles of *Ganoderma lucidum* in anti-aging [J]. Aging and Disease, 2017, 8(6): 691.
- [13] Li L, Xu J X, Cao Y J, et al. Preparation of *Ganoderma lucidum* polysaccharide chromium (III) complex and its hypoglycemic and hypolipidemic activities in high-fat and high-fructose diet-induced pre-diabetic mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 140(C): 782-793.
- [14] 赖长江生, 周融融, 余意, 等. 基于近红外分析和化学计量学方法对不同产地灵芝快速鉴别及多糖含量测定的研究 [J]. 中国中药杂志, 2018, 43(16): 3243-3248.
- [15] 张晨, 孙晓娜. 山桐子鲜果中油脂的提取工艺优化及品质分析 [J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 16-20.
- [16] 李学玲, 龙婷, 杨莉, 等. 超声辅助酶法提取咖啡果皮白藜芦醇工艺优化及其体外抗氧化活性 [J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 71-77.
- [17] Li X L, Zhou A G, Li X M. Inhibition of *Lycium barbarum* polysaccharides and *Ganoderma lucidum* polysaccharides against oxidative injury induced by γ -irradiation in rat liver mitochondria [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(1): 172-178.
- [18] 曾朝蓉, 岳冬, 孙伟, 等. 亚硒酸钠对帕金森病大鼠的黑质形态学与纹状体多巴胺含量及血液水平的影响 [J]. 西部医学, 2020, 32(6): 813-817.
- [19] Peng S, Xu L, Ma J Y, et al. *Achyranthes bidentata* polysaccharide protects dopaminergic neurons from apoptosis induced by rotenone and 6-hydroxydopamine [J]. Neural Regeneration Research, 2018, 13(11): 1981-1987.
- [20] Chen W F, Wu L, Du Z R, et al. Neuroprotective properties of icariin in MPTP-induced mouse model of Parkinson's disease: involvement of PI3K/Akt and MEK/ERK signaling pathways [J]. Phytomedicine, 2017, 25: 93-99.
- [21] Zhang Y, Wu Q, Zhang L, et al. Caffeic acid reduces A53T α -synuclein by activating JNK/Bcl-2-mediated autophagy in vitro and improves behaviour and protects dopaminergic neurons in a mouse model of Parkinson's disease [J]. Pharmacol Research, 2019, 150: 104538.
- [22] Fu Y H, Yuan Y, Halliday G, et al. A cytoarchitectonic and chemoarchitectonic analysis of the dopamine cell groups in the substantia nigra, ventral tegmental area, and reticulorubral field in the mouse [J]. Brain Structure and Function, 2012, 217(2): 591-612.
- [23] Wu Q, Yang X, Zhang Y, et al. Chronic mild stress accelerates the progression of Parkinson's disease in A53T α -synuclein transgenic MICE [J]. Experimental Neurology, 2016, 285: 61-71.
- [24] Chen R, Jin C, Tong Z, et al. Optimization extraction, characterization and antioxidant activities of pectic polysaccharide from tangerine peels [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 187-197.
- [25] 邱现创, 赵宁, 李晨, 等. 铁皮石斛多糖提取工艺优化及对果蝇抗氧化能力的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(2): 273-280.
- [26] Ma T, Sun X, Tian C, et al. Polysaccharide extraction from *Sphallerocarpus gracilis* roots by response surface methodology [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 88: 162-170.
- [27] Liu Y, Zhou Y F, Liu M D, et al. Extraction optimization, characterization, antioxidant and immunomodulatory activities of a novel polysaccharide from the wild mushroom *Paxillus involutus* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 326-332.
- [28] 刘慧, 张春岭, 陈大磊, 等. 响应面法优化超声波提取山楂皮渣三萜酸工艺 [J]. 保鲜与加工, 2017, 17(1): 53-59.
- [29] 杨开, 徐梦婷, 王功紫, 等. 牛樟芝总三萜超声提取及体外活性研究 [J]. 核农学报, 2018, 32(1): 112-122.
- [30] 李欣培, 崔立娟, 王焜佳, 等. 超声辅助酶法预处理对黄酒糟蛋白提取的工艺优化及成分分析 [J]. 中国食物与营养, 2024(11): 1-9.
- [31] Shi M, Yang Y N, Hu X S, et al. Effect of ultrasonic extraction conditions on antioxidative and immunomodulatory activities of a *Ganoderma lucidum* polysaccharide originated from fermented soybean curd residue [J]. Food Chemistry, 2014, 155: 50-56.

(责任编辑 闫杏丽)