秦琴, 朱青永, 杨帅, 等. 黄绿卷毛菇酚类物质的提取、抗氧化与降血糖活性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 249−257. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010188

QIN Qin, ZHU Qingyong, YANG Shuai, et al. Extraction, Antioxidant and Hypoglycemic Activity of *Floccularia luteovirens* Phenolic Compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 249−257. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010188

· 工艺技术 ·

黄绿卷毛菇酚类物质的提取、抗氧化与降血糖活性

秦　琴[1], 朱青永[1], 杨　帅[1], 陈启和[2], 马明珠[3], 余佳莉[1], 刘政捷[1,2,*], 赵亚东[1,*]

（1.浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316022;
2.浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058;
3.浙江省海洋开发研究院, 浙江舟山 316000）

摘　要: 为探究黄绿卷毛菇酚类物质最佳提取工艺，分析其抗氧化和降血糖活性。本研究通过响应面试验法优化黄绿卷毛菇酚类物质最佳提取工艺，并研究了黄绿卷毛菇酚类物质的体外抗氧化、降血糖活性。结果表明：酚类物质最佳工艺为乙醇浓度 48.19%，料液比 1∶38 g/mL，超声时间 35.70 min，在此条件下酚类物质得率为 7.74±0.24 mg/g。对 DPPH 自由基清除率 IC_{50} 为 43.85 μg/mL，对 $ABTS^{+}$自由基清除率为 7.81 mmol/g Trolox，对 FRAP 铁离子还原能力为 1.58 mmol/g $FeSO_4$。在体外降血糖试验中，黄绿卷毛菇酚类物质对 α-淀粉酶抑制率 IC_{50} 为 2.79 mg/mL，对 α-葡萄糖苷酶抑制率 IC_{50} 为 9.85 mg/mL。综上，黄绿卷毛菇酚类物质优异的抗氧化和降血糖活性表明其具有良好开发潜力。

关键词: 黄绿卷毛菇, 酚类物质, 工艺优化, 超声辅助提取, 抗氧化, 降血糖
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0249−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010188
本文网刊:

Extraction, Antioxidant and Hypoglycemic Activity of *Floccularia luteovirens* Phenolic Compounds

QIN Qin[1], ZHU Qingyong[1], YANG Shuai[1], CHEN Qihe[2], MA Mingzhu[3], YU Jiali[1], LIU Zhengjie[1,2,*], ZHAO Yadong[1,*]

（1.College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2.College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3.Zhejiang Marine Development Research Institute, Zhoushan 316000, China）

Abstract: This study aimed to investigate the optimal extraction conditions for phenolic compounds from *Floccularia luteovirens* and to analyze their antioxidant and hypoglycemic activities. The extraction process for phenolic compounds from *Floccularia luteovirens* was optimized using response surface methodology, and their *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activities were investigated. The optimal extraction conditions for phenolic compounds were found to be an ethanol concentration of 48.19%, a solid-to-liquid ratio of 1∶38 g/mL, and an ultrasound time of 35.70 minutes, resulting in a yield of 7.74±0.24 mg/g. The IC_{50} for DPPH radical scavenging was 43.85 μg/mL, the $ABTS^{+}$ scavenging capacity was 7.81 mmol/g Trolox, and the FRAP ferric ion reduction capacity was 1.58 mmol/g $FeSO_4$. *In vitro* hypoglycemic assays, the phenolic compounds from *Floccularia luteovirens* exhibited an IC_{50} of 2.79 mg/mL for α-amylase inhibition and an IC_{50} of 9.85 mg/mL for α-glucosidase inhibition. In conclusion, the phenolic compounds from *Floccularia luteovirens* demonstrate

收稿日期: 2025−01−21
基金项目: 舟山市重大产业科技攻关项目（2024C03004）; 国家级大学生创新创业训练计划项目（202210340033）。
作者简介: 秦琴（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品活性物质, E-mail: 1523487317@qq.com。
*** 通信作者:** 刘政捷（1986−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品活性物质, E-mail: liuzjemail@163.com。
赵亚东（1985−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 天然多糖、海洋生物材料, E-mail: zhaoyd@zjou.edu.cn。

excellent antioxidant and hypoglycemic activities, indicating their strong potential for development.

Key words: *Floccularia luteovirens*; phenolic compounds; process optimization; ultrasonic-assisted extraction; antioxidant; hypoglycemic

黄绿卷毛菇(*Floccularia luteovirens*)是生长在青藏高原上的珍稀食药用菌[1]。其药用价值在唐代就有记载,藏医书籍《四部医典》记载了它具有消除肿胀和治疗颈项僵硬的效果[2]。在现代,祁连山牧民还认为它有治疗感冒的效果。目前诸多研究表明,黄绿卷毛菇作为一种珍稀的食药用菌,其营养价值及食用价值极高。黄绿卷毛菇含有多糖[3]、Melleolides[4−5]、麦角硫因[6]、凝集素[7]、甾醇类化合物[8]、核苷类化合物[8]、活性肽[9] 等活性物质。酚类物质具有多种生物活性,但在已报道的研究性论文中,对黄绿卷毛菇酚类物质的研究还未见到,因此展开对黄绿卷毛菇酚类物质的研究。

酚类物质被称为天然的抗氧化剂,抗氧化性是酚类的主要生物活性[10]。柴林山等[11] 研究发现红托竹荪菌托富含多酚物质,且具有较好抗氧化活性。王艳[12] 从六妹羊肚菌子实体中制备的多酚具有较强的抗氧化活性,可以发挥抗 CRC 效应,被认为是一种有益生效应的多酚物质。许嘉文等[13] 研究发现金花茶多酚溶液具有显著清除超氧阴离子自由基、DPPH 自由基及 ABTS 阳离子自由基的能力,且随着多酚浓度的提升,其抗氧化活性明显提高。有研究报道,酚类物质具有降血糖活性,对预防机体糖尿病、心脑血管等慢性疾病具有良好的应用前景[14]。王安建等[15] 发现纯化前后的香菇柄多酚均能够抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性,且纯化后多酚对两种酶的抑制活性显著提高,表明香菇柄多酚具有一定降血糖活性。周芷聿[16] 发现姬松茸多酚具有良好的自由基清除能力和 α-葡萄糖苷酶抑制活性。

酚类物质的提取方法有很多,如溶剂提取法、超声波提取法、微波提取法以及酶辅助提取法等[17]。超声辅助提取能促进种子水合、破坏细胞壁以增强传质,且不影响多酚结构,从而显著提升提取效率[18]。超声辅助萃取利用高频声波(>20 kHz)产生的空化效应,通过气泡塌陷时的高剪切力实现高效提取[19]。刘芸等[20] 利用超声辅助提取法提取辣木叶酚类物质,发现在乙醇浓度 80%、料液比 1∶30、超声时间 52 min、超声温度 51 ℃ 条件下酚类物质含量最高。Sun 等[21] 利用超声辅助提取槟榔种子多酚,发现在超声功率 87 W,乙醇浓度 65%,提取温度 62 ℃,提取时间 153 min),槟榔籽多酚实际提取率为 139.62 mg/g。

本实验室在前期实验中发现黄绿卷毛菇子实体中主要包含阿魏酸(ferulic acid)、对香豆酸(p-coumaric acid)、4-羟基苯甲酸乙酯(ethyl 4-hydroxybenzoate)、4-羟基苯甲酸(4-hydroxybenzoic acid)等 4 种酚类物质,并且在预实验中发现黄绿卷毛菇中粗提的酚类物质具有一定的抗氧化和降血糖活性。因此,本研究在此基础上采用单因素实验和响应面法优化超声辅助提取黄绿卷毛菇酚类物质的工艺参数,以及对 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基清除作用和 FRAP 铁离子还原能力评价抗氧化活性。通过对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制能力评价酚类物质的降血糖能力。研究结果为黄绿卷毛菇资源的高值化利用提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黄绿卷毛菇　购自青海市祁连县;没食子酸、福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、α-葡萄糖苷酶(7×10^5 U/mL)、α-淀粉酶(1×10^4 U/g)、对硝基苯基-β-D-吡喃半乳糖苷　北京索莱宝科技有限公司;ABTS 试剂盒、FRAP 试剂盒　南京建成生物工程研究所有限公司;其余试剂均为国产分析纯。

DZF-6050 型电热鼓风干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司;BSA224S-CW 型电子分析天平　上海天平仪器技术有限公司;UA03 型超声波清洗机　北京维根技术有限公司;N-1300S 型旋转蒸发仪　东京理化器械株式会社;AB33PH-F 型 pH 计　上海奥豪斯国际贸易有限公司;DNM-9602 型酶标仪　北京普朗新技术有限公司;SH-WH5 型恒温水浴锅　杭州申花科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　黄绿卷毛菇酚类物质提取液的制备　参照 Che 等[22] 的方法,稍作修改。黄绿卷毛菇经 45 ℃ 干燥后粉碎过 70 目筛。称取 1 g 粉末以 1∶30 料液比加入 50% 乙醇,50 ℃ 超声提取 30 min,3000 r/min 离心 15 min 后取上清液。

1.2.2　单因素实验设计

1.2.2.1　浸提次数对酚类物质含量的影响　将黄绿卷毛菇粉末在乙醇浓度为 50%,料液比 1∶30,超声时间 30 min,超声温度 50 ℃ 条件下,探究浸提次数 1、2、3 次对黄绿卷毛菇酚类物质含量的影响。

1.2.2.2　乙醇浓度对酚类物质含量的影响　将黄绿卷毛菇粉末在浸提 1 次,料液比 1∶30,超声时间 30 min,超声温度 50 ℃ 条件下,探究乙醇浓度 30%、40%、50%、60%、70% 对黄绿卷毛菇酚类物质含量的影响。

1.2.2.3　料液比对酚类物质含量的影响　将黄绿卷毛菇粉末在浸提 1 次,乙醇浓度 50%,超声时间 30 min,超声温度 50 ℃ 条件下,探究料液比 1∶10、1∶20、1∶30、1∶40、1∶50 对黄绿卷毛菇酚类物质含量的影响。

1.2.2.4　超声时间对酚类物质含量的影响　将黄绿卷毛菇粉末在浸提 1 次，乙醇浓度 50%，料液比 1∶30，超声温度 50 ℃ 条件下，探究超声时间 10、20、30、40、50 min 对黄绿卷毛菇酚类物质含量的影响。

1.2.2.5　超声温度对酚类物质含量的影响　将黄绿卷毛菇粉末在浸提 1 次，乙醇浓度 50%，料液比 1∶30，超声时间 30 min 条件下，探究超声温度 30、40、50、60、70 ℃ 对黄绿卷毛菇酚类物质含量的影响。

1.2.3　响应面试验设计　根据单因素实验结果，确定浸提次数为 2 次。根据剩余各因素对酚类物质提取量影响的大小选取其中影响较大的 3 个因素，利用 Design Expert 10.0 软件进行工艺优化设计及数据分析，并对设计结果进行验证，确定最佳提取条件。实验因素及水平如表 1。

表 1　响应面试验因素水平设计

Table 1　Response surface test factors and level design

因素	水平		
	−1	0	1
A乙醇浓度(%)	40	50	60
B料液比(g/mL)	1∶30	1∶40	1∶50
C超声时间(min)	30	40	50

1.2.4　没食子酸标准曲线的绘制　参考孙倩[23] 的方法，略作修改。将 0.1 mg/mL 母液稀释至 1~6 μg/mL 梯度溶液，加入福林酚试剂和 10% 碳酸钠溶液，避光反应 30 min 后测定 760 nm 吸光度，建立标准曲线。

1.2.5　黄绿卷毛菇酚类含量的测定　取 1 mL 黄绿卷毛菇提取液置于 10 mL 比色管中，蒸馏水定容，测定其吸光度，根据式(1)计算出酚类物质含量。

$$酚类含量(mg/g)=\frac{C\times V_1\times V_3}{V_2\times W}\qquad 式（1）$$

式中：C 表示移取液浓度，mg/mL；V_1 表示移取液定容体积，mL；V_2 表示移取液体积，mL；V_3 表示提取液定容体积，mL；W 表示子实体粉末质量，g。

1.2.6　黄绿卷毛菇酚类物质抗氧化和降血糖活性

1.2.6.1　DPPH 自由基清除活性测定　参照杨静等[24] 的方法，略作修改。用无水乙醇配制 DPPH 溶液(0.1 mmol/L)，将 10~60 μg/mL 样品溶液与 0.1 mmol/L DPPH 溶液等体积混合，避光反应30 min 后测定 517 nm 吸光度。以抗坏血酸为阳性对照，根据式(2)计算 DPPH 自由基清除率。

$$DPPH清除率(\%)=\left[1-\frac{(A_1-A_2)}{A_0}\right]\times 100\qquad 式（2）$$

式中：A_0 表示 DPPH 溶液的吸光度；A_1 表示样品或阳性对照加 DPPH 溶液的吸光度；A_2 表示样品溶液的吸光度。

1.2.6.2　$ABTS^+$自由基清除活性测定　采用总抗氧化能力检测试剂盒(ABTS 法)评价黄绿卷毛菇酚类物质 $ABTS^+$自由基清除能力。试验主要步骤参考说明书。以不同浓度的 Trolox 溶液作标准曲线测定黄绿卷毛菇酚类物质的 $ABTS^+$自由基清除能力，mmol/g Trolox。

1.2.6.3　FRAP 铁离子还原能力测定　采用总抗氧化能力检测试剂盒(FRAP 法)评价黄绿卷毛菇酚类物质 FRAP 铁离子还原能力。将 5 μL 样液与 180 μL 工作液(检测缓冲液∶基质液∶底物液=10∶1∶1)混合，37 ℃ 避光反应 5 min 后测定 593 nm 吸光度。以 $FeSO_4$ 作为标准品，在 0.15、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 mmol/L 浓度下制作标准曲线，FRAP 自由基清除能力的结果用 $FeSO_4$ 当量值表示。

1.2.6.4　α-淀粉酶抑制能力测定　参考王倩等[25] 的方法，略作修改。取 0.5 mL 1~3 mg/mL 样品溶液与等体积 0.5 U/mL 酶液混合，37 ℃ 水浴 15 min 后加入 1 mL 10 mg/mL 淀粉溶液，继续反应 10 min 后加入 1 mL DNS 显色剂，沸水浴 10 min 后测定 540 nm 吸光度。以阿卡波糖为阳性对照，按标准方法设置对照组，按公式(3)计算抑制率，根据抑制曲线计算得到半抑制浓度(IC_{50} 值)。

$$抑制率(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4}\right)\times 100\qquad 式（3）$$

式中：A_1 表示实验组吸光度值；A_2 表示背景组吸光度值；A_3 表示阴性对照组吸光度值；A_4 表示空白组。

1.2.6.5　α-葡萄糖苷酶抑制能力测定　参考杨成峻等[26] 的方法，略作修改。用磷酸盐缓冲液(PBS)配制 1~5 mg/mL 的样品溶液，将 50 μL 样品溶液与等体积 1 U/mL 酶液于 96 孔板中 37 ℃ 反应 10 min，加入 50 μL 5 mmol/L 对硝基苯基-α-D-吡喃半乳糖苷底物反应 20 min 后，用 100 μL 1.0 mol/L 碳酸钠溶液终止反应，测定 405 nm 吸光度。以阿卡波糖为阳性对照。测定吸光度(405 nm)，按式(4)计算抑制率。

$$抑制率(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100\qquad 式（4）$$

式中：A_0 表示空白对照的吸光度；A_1 表示样品或阳性对照的吸光度。

1.3　数据处理

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行差异显著性检验和相关性分析，Origin 2021 软件作图。每个试验重复 3 次，数据以“均值±标准偏差”表示，$P<0.05$ 被认为具有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　浸提次数对酚类物质含量的影响　由图 1A 可知，随着浸提次数的增加，酚类物质含量逐渐增加，浸提两次的酚类物质总含量为 5.37 mg/g，比第一次约提高 25.50%，浸提三次的酚类物质总含量为 5.55 mg/g，仅比浸提两次提高了 3.36%，无明显变

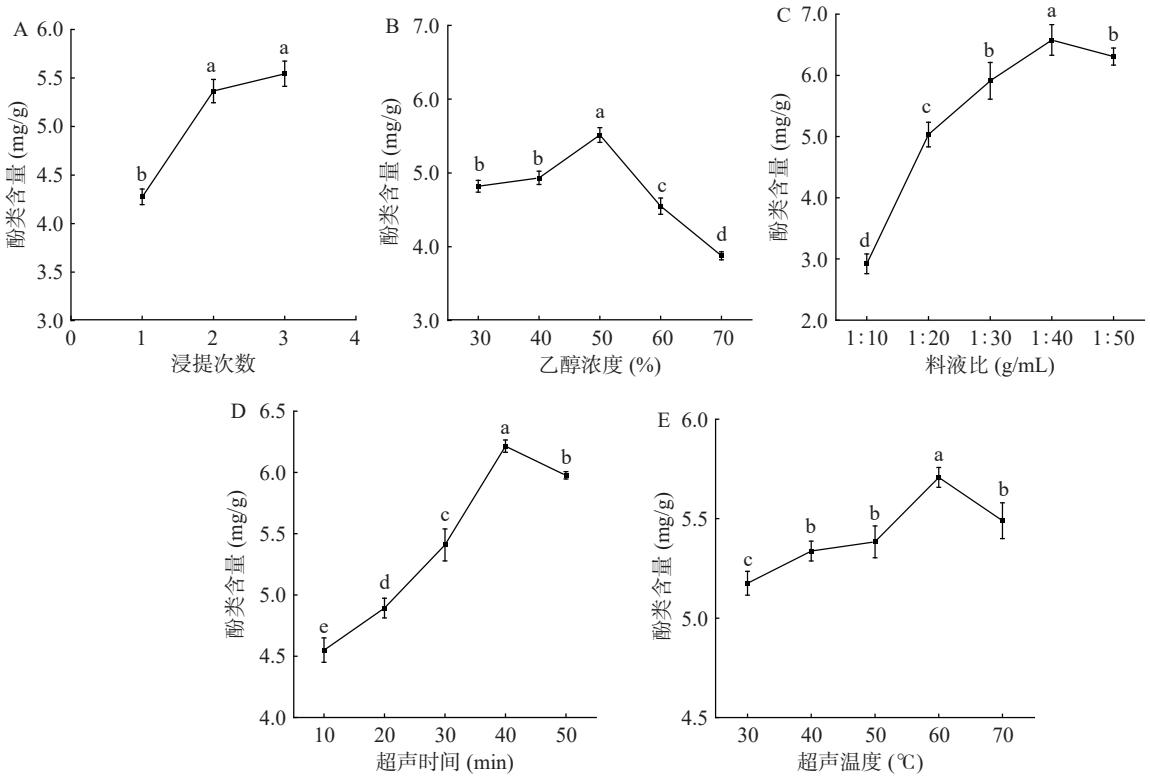


图 1 不同因素对黄绿卷毛菇酚类物质提取量的影响

Fig.1 Effect of different factors on the extraction of phenolic compounds from *Floccularia luteovirens*

注: 各指标中不同小写英文字母表示差异显著(P<0.05); 图 3~图 5 同。

化。根据之前研究[27], 这是因为长时间的超声提取使酚类物质分子结构在提取过程中受到破坏, 也可能是浸提两次已经把黄绿卷毛菇中大部分酚类物质提取出来。

2.1.2 乙醇浓度对酚类物质含量的影响 由图 1B 所示, 随着乙醇浓度增加, 黄绿卷毛菇酚类物质含量逐渐增大, 乙醇浓度为 50% 时, 含量达到最高值 5.51 mg/g, 当乙醇浓度超过 50% 时, 酚类物质含量骤降(P<0.05), 这可能是因为乙醇浓度过高, 可能会导致黄绿卷毛菇中的酚类物质结构遭到破坏, 降低酚类的提取量; 当乙醇体积分数过高时会导致溶剂极性更高, 导致黄绿卷毛菇子实体中脂溶性杂质溶出, 与酚类物质竞争同种溶剂, 导致溶液中酚类化合物含量降低[28]。

2.1.3 料液比对酚类物质含量的影响 如图 1C 所示, 随着料液比中溶剂比例的增加, 酚类物质的产率逐渐增加, 在 1∶40 g/mL 时达到最大值, 为 6.58 mg/g。液料比超过 1∶40 g/mL 时, 提取量开始降低(P<0.05), 可能由于乙醇的体积占比较大, 在超声过程中细胞壁破碎不完全, 黄绿卷毛菇的溶解量降低[29]。

2.1.4 超声时间对酚类物质含量的影响 如图 1D 所示, 随着超声时间的增加, 提取液中酚类物质含量增加, 在 40 min 时达到最大值 6.21 mg/g(P<0.05)。这是因为随着时间的延长, 黄绿卷毛菇酚类化合物迅速溶解, 使总多酚含量逐渐增加[28]。当超声时间大于 40 min 时, 酚类物质得率开始显著降低(P<0.05)。这可能是由于经过长时间超声, 一些酚类物质分子结构被破坏, 导致提取液中酚类物质含量下降[30]。

2.1.5 超声温度对酚类物质含量的影响 如图 1E 所示, 提取液中酚类物质含量随着提取温度的升高而增加, 在 60 ℃ 时达到最大值。升温会增加酚类在乙醇中的溶解度, 因为高温可以增强分子动能促进其从原料基质中解离, 并加速扩散速率, 从而提高提取率[31]。当温度达到 70 ℃ 时, 提取率明显下降, 这主要是由于酚类是热敏性物质, 容易被热氧化, 导致提取率下降。

2.2 响应面试验结果

2.2.1 响应面试验设计及结果 为了进一步提高提取率, 以提取液中黄绿卷毛菇酚类含量作为响应值, 以乙醇浓度、料液比、超声时间作为自变量, 响应面试验设计及结果见表 2。

将以上各因素进行回归拟合, 得到如下回归方程: $Y=7.73-0.13A-0.091B-0.17C+0.24AB+0.27AC+0.15BC-0.8A^2-0.54B^2-0.28C^2$。从表 3 可以看出, 响应值模型 P 值小于 0.05, 表示该二次项方程模型显著, 同时该模型失拟项 P 值大于 0.05, 说明模型失拟项不显著, 可以较好的拟合实验数据。响应值可信度分析的模型决定系数 R^2 为 0.98, 表示该模型相关度很好; 变异系数为 1.83%, 表示该模型置信度较高, 可以反映试验的真实性。综上所述, 该回归模型对响应值的拟合程度较高, 方程能够较好地反映响应值与自变量的关系。

表 2　响应面试验设计及结果

Table 2　Response surface test design and results

实验号	A乙醇浓度（%）	B料液比（g/mL）	C超声时间（min）	Y提取量（mg/g）
1	60	50	40	6.32
2	40	40	30	7.24
3	40	40	50	6.21
4	50	40	40	7.66
5	50	40	40	7.68
6	60	30	40	6.09
7	50	30	50	6.73
8	50	50	50	6.91
9	50	50	30	6.78
10	40	50	40	6.21
11	50	40	40	7.88
12	40	30	40	6.93
13	50	40	40	7.72
14	50	40	40	7.70
15	60	40	50	6.59
16	60	40	30	6.55
17	50	30	30	7.20

表 3　回归方程的方差分析

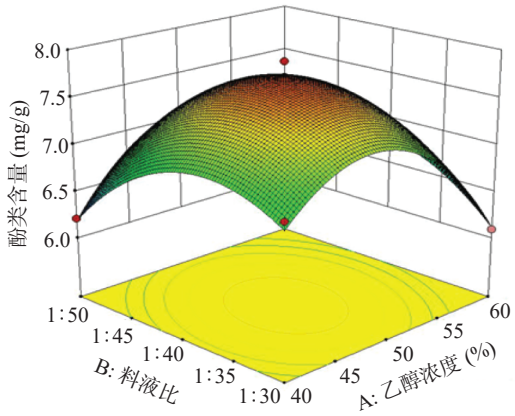
Table 3　Anova for regression equations

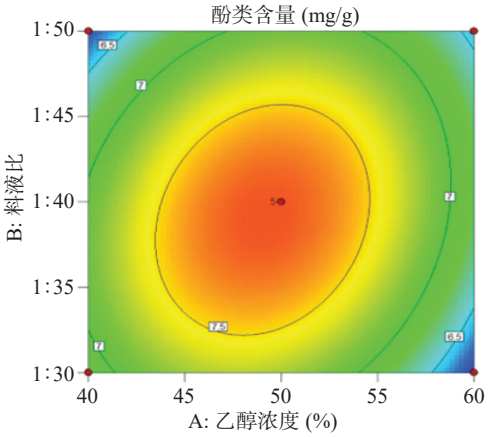
方差来源	自由度	平方和	均方	*F*值	*P*值	显著性
模型	9	5.687	0.632	38.954	<0.0001	**
A	1	0.135	0.135	8.334	0.0234	*
B	1	0.067	0.066	4.106	0.0823	
C	1	0.221	0.221	13.630	0.0077	**
AB	1	0.226	0.226	13.908	0.0074	**
AC	1	0.286	0.286	17.644	0.0040	**
BC	1	0.09	0.09	5.548	0.0507	
A^2	1	2.688	2.688	165.699	<0.0001	**
B^2	1	1.235	1.234	76.107	<0.0001	**
C^2	1	0.333	0.334	20.568	0.0027	**
残差	7	0.114	0.016			
失拟项	3	0.083	0.027		0.1254	
纯误差	4	0.031				
总离差	16	5.801				
R^2	9	5.687				
矫正R^2	1	0.135				
变异系数(%)	1	0.066				

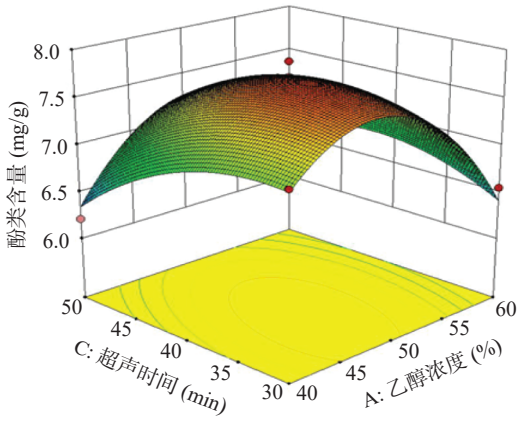
注：**表示差异极显著（*P*<0.01），*表示差异显著（*P*<0.05）。

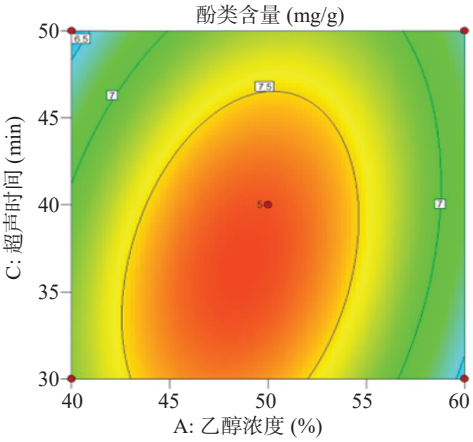
2.2.2　数学模型及响应面分析　从图 2 可知，随着乙醇浓度、超声时间的增加，料液比的降低，酚类含量呈现先增加后减少的趋势，通过 *F* 值可知，各因素对提取量的影响大小为：超声时间（C）>乙醇浓度（A）>料液比（B）。在交互项中，AB 与 BC 对响应值的影响显著（*P*<0.05），说明乙醇浓度与料液比、料液比与超声时间两两因素交互作用对黄绿卷毛菇多酚含量的影响较大；在二次项中 A^2、B^2 对黄绿卷毛菇多酚含量均有极度显著影响（*P*<0.0001），二次项 C^2 显著（*P*<0.05）。通过响应面试验优化得到最佳提取工艺为：乙醇浓度 48.19%，料液比 1∶38 g/mL，超声时间 35.70 min，预测得到的最高酚类含量为 7.78 mg/g。

2.2.3　响应面优化结果验证试验　为了验证模型预测的准确性，在所得的最佳提取工艺条件下进行了黄绿卷毛菇酚类物质的提取实验。通过响应面试验优化得到最佳提取工艺为：乙醇浓度 48.19%，料液比









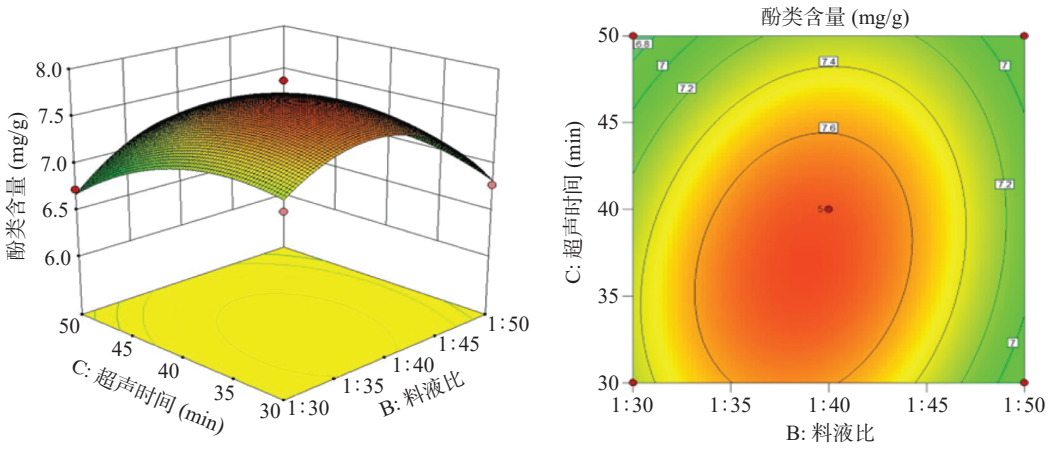


图 2 乙醇浓度、料液比和超声时间两两交互作用对酚类物质含量的影响

Fig.2 Effect of two-by-two interaction of ethanol concentration, material-liquid ratio and sonication time on phenolic compounds content

1∶38 g/mL, 超声时间 35.70 min。考虑到实验可操作性, 将上述最佳提取条件改为: 乙醇浓度 48%, 料液比 1∶38 g/mL, 超声时间 36 min, 实验平行重复三次, 实际所测得的黄绿卷毛菇酚类物质含量为 7.74±0.24 mg/g, 与预测值 7.78 mg/g 基本一致, 表明响应面实验优化得到的提取工艺参数可靠, 具有实际应用价值。

2.3 黄绿卷毛菇酚类物质抗氧化活性分析

2.3.1 DPPH 自由基清除活性分析 DPPH 法通过测定深紫色溶液(DPPH-乙醇)与抗氧化剂反应后的褪色程度(λ_{max}=517 nm)来评估自由基清除活性, 褪色程度与抗氧化能力呈正相关[32]。IC_{50} 定义为达到 50% DPPH 自由基清除率的抗氧化剂浓度, 是抗氧化活性的重要指标[33]。如图 3 所示, 随着黄绿卷毛菇酚类物质浓度的增大, 对 DPPH 自由基的清除率逐渐上升。当浓度为 50 μg/mL 时, V_C 和样品的自由基清除率分别为 93.14%、52.64%, IC_{50} 分别为 10.12、43.85 μg/mL。样品 IC_{50} 浓度高于阳性对照 V_C, 表明其具有显著的自由基清除能力。酚类化合物分子结构中羟基的数量和位置在很大程度上决定了它们抗氧化性的强弱[34], 试验结果表明, 黄绿卷毛菇酚类物质具有较强的 DPPH 自由基清除能力, 这可能与它的酚类组分结构有关。

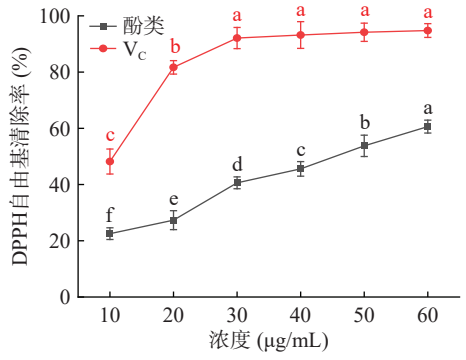


图 3 酚类物质对 DPPH 自由基的清除率

Fig.3 Scavenging of DPPH radicals by phenolic compounds

2.3.2 $ABTS^+$自由基清除活性分析 $ABTS^+$自由基清除率是一种常见的分析方法, 用于评估食品、药物和生物样品中抗氧化剂的清除能力[35]。以不同浓度的 Trolox 溶液作标准曲线, 以 Trolox 标准溶液浓度(mmol/L)为 y 轴, 以测量的 OD 值为 x 轴, 得到拟合标准曲线回归方程: y=−0.354x+1.7572(R^2=0.9911)。如表 4 所示, 计算得出样品的 $ABTS^+$自由基清除能力为 7.81 mmol/g Trolox, 表明黄绿卷毛菇酚类物质具有良好的 $ABTS^+$自由基清除能力。

表 4 酚类物质抗氧化活性

Table 4 Antioxidant activity of phenolic substances

	$ABTS^+$自由基清除活性	FRAP铁离子还原活性
标准曲线	y=-0.354x+1.7572 (R^2=0.9911)	y=0.3345x+0.0785 (R^2=0.9943)
当量值	7.81 mmol/g Trolox	1.58 mmol/g $FeSO_4$

2.3.3 FRAP 铁离子还原活性分析 FRAP 法通过测定样品还原 Fe^{3+}为 Fe^{2+}的能力来评价其抗氧化活性[36]。以 $FeSO_4$ 为标准品制作标准曲线, 以标准液浓度(mmol/L)为 y 轴, 以测量的 OD 值为 x 轴, 结果如表 4, 得到拟合标准曲线回归方程为: y=0.3345x+0.0785(R^2=0.9943)。计算得出样品的 FRAP 铁离子还原能力为 1.58 mmol/g $FeSO_4$, 表明黄绿卷毛菇酚类物质具有良好的铁离子还原能力。

2.4 黄绿卷毛菇酚类物质降血糖活性

2.4.1 α-淀粉酶抑制能力分析 α-淀粉酶抑制试验是评估物质抑制酶活性的重要方法, 在降糖药物研发和食品工业中具有应用价值[37]。由图 4 可知, 随着酚类化合物浓度增加, 对 α-淀粉酶抑制能力逐渐增强, 在 3 mg/mL 时抑制率达 52.92%, IC_{50} 为 2.79 mg/mL, 但其抑制活性弱于阿卡波糖。酚类化合物通过结合 α-淀粉酶活性位点形成复合物, 阻碍底物结合或改变酶构象, 从而抑制酶活性[38], 具体抑制类型分为竞争性抑制、非竞争性抑制、金属离子螯合和氧化还原作用等[39]。代嫚婷等[40] 的研究结果表明, 海黄

牡丹不同部位的多酚对 α-淀粉酶均具有较强抑制能力，并可能成为降血糖食品的新原料，本研究结果与之相吻合。

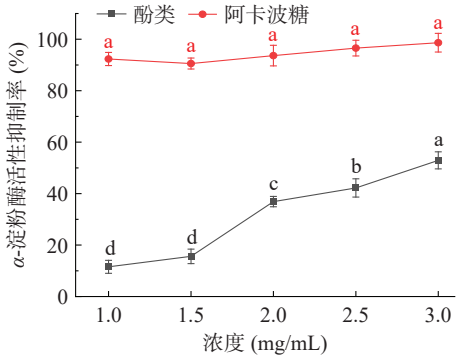


图 4　酚类物质对 α-淀粉酶活性的抑制能力

Fig.4　Inhibitory capacity of phenolic compounds on α-amylase activity

2.4.2　α-葡萄糖苷酶抑制能力分析　α-葡萄糖苷酶抑制试验用于评估化合物对该酶活性的影响，该酶催化糖苷键水解，调控血糖水平，是糖尿病治疗的重要靶点[41]。如图 5 所示，黄绿卷毛菇酚类物质对 α-葡萄糖苷酶具有剂量依赖性抑制作用，但抑制效果明显低于阿卡波糖(浓度为 1 mg/mL 时，抑制率 91.56%)。而黄绿卷毛菇酚类物质浓度超过 3 mg/mL 后抑制率无显著变化(P>0.05)，在浓度为 5 mg/mL条件下为 35.98%，IC_{50} 为 9.85 mg/mL。酚类化合物通过氢键、疏水作用、范德华力及螯合等分子相互作用与酶活性位点结合，改变其构象或动态特性，从而抑制酶活性[42]。不同的酚类化合物可能具有不同的结合位点和作用方式，这在抑制酶活性方面具有潜在的多样性和复杂性，这可能是黄绿卷毛菇酚类化合物对 α-葡萄糖苷酶抑制能力不显著的原因。

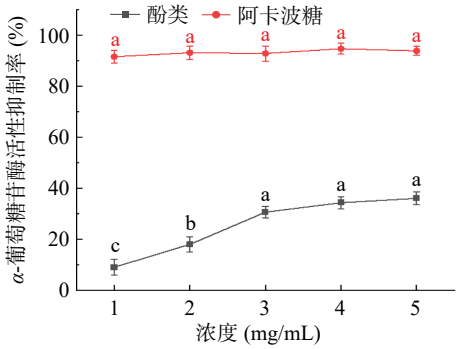


图 5　酚类物质对 α-葡萄糖苷酶活性的抑制能力

Fig.5　Inhibitory capacity of phenolic compounds on α-glucosidase activity

3　结论

本文采用响应面法对超声辅助提取黄绿卷毛菇酚类物质进行工艺优化，得到最佳工艺参数为：乙醇浓度 48%、料液比 1∶38 g/mL、超声时间 36 min，此时黄绿卷毛菇酚类物质含量为 7.74±0.24 mg/g。体外活性研究表明，黄绿卷毛菇酚类物质有较好的 DPPH 自由基清除能力、$ABTS^+$自由基清除能力和铁离子还原能力。在降血糖活性方面，黄绿卷毛菇酚类物质对 α-淀粉酶抑制活性 IC_{50} 为 2.79 mg/mL，对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 为 9.85 mg/mL。在其他食用菌酚类物质的研究中，*Lentinula edodes* 提取物对 DPPH 自由基清除能力为 IC_{50} 为 48.30 μg/mL，其酚类物质主要是儿茶素和槲皮素[43]。*Hericium erinaceus* 提取物对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制活性为 IC_{50} 为0.47 和 0.63 mg/mL，其酚类物质主要是阿魏酸、没食子酸、肉桂酸、香草酸、3,4-二羟基苯甲酸[44]。黄绿卷毛菇酚类物质与上述两种食用菌有一定差异，从而引起了其抗氧化和抗血糖活性的不同。本研究优化了超声辅助提取工艺，并证实了黄绿卷毛菇酚类物质的抗氧化与抗血糖能力，有助于黄绿卷毛菇的深入研究和在食品领域中的应用。未来还可通过细胞模型或动物实验对抗血糖机制及抗炎、抑菌等活性进行研究。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 戴玉成, 周丽伟, 杨祝良, 等. 中国食用菌名录[J]. 菌物学报, 2010, 29(1): 1−21. [DAI Y C H, ZHOU L W, YANG Z H L, et al. A revised checklist of edible fungi in China[J]. Mycosystema, 2010, 29(1): 1−21.]

[2] 芦笛. 唐代藏医籍所载真菌药探析[J]. 食药用菌, 2013, 21(4): 252−254. [LU D. Exploration of fungal medicines contained in Tibetan medical books of the Tang Dynasty[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2013, 21(4): 252−254.]

[3] 刘洋. 黄绿蜜环菌多糖抗肿瘤作用及对小鼠免疫功能的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014. [LIU Y. The Antitumor effect and immunity function of polysaccharide from *Floccularia luteovirens* on mice[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014.]

[4] ZHU Q, ZHANG X, XU H, et al. Preservation of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) by pullulan and melleolide composite preservatives[J]. Food Control, 2024, 155: 110057.

[5] ZHANG L, LIU Z, MA M, et al. Preparation and characterization of highly stable melleolides chitosan nanoemulsion and its effect on Salmo salar preservation[J]. LWT, 2025, 216: 117337.

[6] 刘政捷. 黄绿卷毛菇的生理特性、关键活性物质挖掘及其多组学研究与遗传代谢解析[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [LIU Z J. Study on physiological characteristics, important bioactive compounds, the multi-omics elucidation and genetic characterization of *Floccularia luteovirens*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]

[7] FENG K, LIU Q H, NG T B, et al. Isolation and characterization of a novel lectin from the mushroom *Armillaria luteovirens*[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2006, 345(4): 1573−1578.

[8] 马琳. 黄绿蜜环菌化学成分及生物活性研究[D]. 天津: 天津大学, 2015. [MA L. Study on chemical constituents and bioactivity of *Armillaria luteovirens*[D]. Tianjin: Tianjin University,

2015.]
[9] 焦迎春, 余梅, 唐达. 黄绿蜜环菌肽的分离及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(8): 156−158. [JIAO Y C, YU M, TANG D. Studies on isolation and antioxidant activity of *Armillaria luteo-virens* peptides[J]. Food Research and Development, 2010, 31(8): 156−158.]
[10] SHORI A B. Storage quality and antioxidant properties of yogurt fortified with polyphenol extract from nutmeg, black pepper, and white pepper[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2022, 57: 24−30.
[11] 柴林山, 李剑梅, 张疏雨, 等. 红托竹荪菌托多酚提取工艺响应面法优化及其抗氧化活性分析[J]. 微生物学杂志, 2024, 44(6): 53−61. [CHAI L S, LI J M, ZHANG S Y, et al. Optimization of polyphenols extraction techonology from red volva of *Dictyophora tubtovalvata* by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(6): 53−61.]
[12] 王艳. 六妹羊肚菌子实体多酚的制备及其抗结肠癌效应的研究[D]. 太原: 太原师范大学, 2024. [WANG Y. Preparation of polyphenols from *Morchella sextelat* fruiting body and its anti-colorectal cancer effect[D]. Taiyuan: Taiyuan Normal University, 2024.]
[13] 许嘉文, 孙庆, 阿丽娅·阿布杜热依木, 等. 金花茶多酚制备、成分分析及其体内外抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 205−214. [YU J W, SUN Q, ABUDUREYIMU A L Y, et al. Preparation and component analysis of *Camellia nitidissima* Chi polyphenols and their antioxidant activites *in vivo* and *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 205−214.]
[14] 马玉辉, 谭斌, 吕莹果, 等. 谷物多酚降糖降脂作用的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(8): 1−15. [MA Y H, TAN B, LÜ Y G. Research progress on hypoglycemic and lipid-lowering effects of grain polyphenols[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(8): 1−15.]
[15] 王安建, 李顺峰, 张丽华, 等. 香菇柄多酚负压提取、纯化及体外活性评价[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(12): 51−58. [WANG A J, LI S F, ZHANG L H. Vacuum extraction, purification and *in vitro* activities evaluation of polyphenols from *Lentinus edodes stipes*[J]. China Food Additives, 2023, 34(12): 51−58.]
[16] 周芷聿. 姬松茸多酚降血糖活性及其作用机制的研究[J]. 现代食品, 2024, 30(18): 214−216. [ZHOU Z L. Study on hypoglycemic activity of *Agaricus blazei* antler polyphenol and its mechanism of action[J]. Modern Food, 2024, 30(18): 214−216.]
[17] SANG J, SANG J, MA Q, et al. Extraction optimization and identification of anthocyanins from *Nitraria tangutorun* Bobr. seed meal and establishment of a green analytical method of anthocyanins[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 386−395.
[18] ZHONG X, ZHANG S, WANG H, et al. Ultrasound-alkaline combined extraction improves the release of bound polyphenols from pitahaya (*Hylocereus undatus* 'Foo-Lon') peel: Composition, antioxidant activities and enzyme inhibitory activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106213.
[19] ZHANG Y, ZHANG S, YANG X, et al. Enhancing the fermentation performance of frozen dough by ultrasonication: Effect of starch hierarchical structures[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 106: 103500.
[20] 刘芸, 魏宗敏, 陈忠铃, 等. 辣木叶多酚的超声提取及抗氧化活性分析[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(2): 52−60. [LIU Y, WEI Z M, CHEN Z L, et al. Analysis of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from *Moringa oleifera* leaves and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2023, 34(2): 52−60.]
[21] SUN Y, LU J, LI J, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polyphenol from Areca nut (*Areca catechu* L.) seeds using response surface methodology and its effects on osteogenic activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 98: 106511.
[22] CHE H X, ZHANG R, WANG X, et al. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from *Phyllanthi fructus*: Comprehensive insights from extraction optimization and antioxidant activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107083.
[23] 孙倩. 白首乌酚类物质分离纯化及抗氧化活性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021. [SUN Q. Study on separation, purification and antioxidant activity of phenolic substances from *Cynanchum auriculatum* Royle ex wight[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2021.]
[24] 杨静, 李博, 张延妮. 拐枣多糖的反复冻融回流工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 273−279. [YANG J, LI B, ZHANG Y N. Optimization of repeated freezing-thawing reflux for extraction of polysaccharide from *Hovenia dulcis* and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 273−279.]
[25] 王倩, 王娟, 傅金凤, 等. 青香蕉果肉多酚成分鉴定及其对淀粉酶、葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 1−12. [WANG Q, WANG J, FU J F, et al. Identification of polyphenolic components in unripe banana pulp and their inhibitory effects on *α*-amylase and *α*-glucosidase[J]. Food Science, 2024, 45(7): 1−12.]
[26] 杨成峻, 陈明舜, 刘成梅, 等. 花椒果皮多酚类成分鉴定及降血糖活性[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 271−278. [YANG C J, CHEN M S, LIU C M, et al. Chemical composition and hpyerglycemic activity of phenolic extract from *Zanthoxylum bungeanum* pericarps[J]. Food Science, 2023, 44(2): 271−278.]
[27] 林凡, 侯笑笑, 刘靖宇, 等. 蛹虫草子实体多糖提取工艺及其体外抗氧化性研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2): 122−128. [LIN F, HOU X, LIU J Y, et al. Extraction technology and antioxidant activity of polysaccharides from *Cordyceps militaris* fruiting body[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(2): 122−128.]
[28] 祝媛媛, 任晓聪, 刘元松, 等. 响应面法优化马齿苋总多酚提取工艺及其抗氧化活性分析[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(4): 119−123. [ZHU Y Y, REN X C, LIU Y S, et al. Optimization of total polyphenols extraction process from *Portulaca oleracea* L. by response surface method and analysis of its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(4): 119−123.]
[29] 郭松, 卢全, 徐停停, 等. 响应面法优化龙骨风多酚提取工艺及其活性的初步研究[J]. 食品工业, 2024, 45(11): 77−82. [GUO S, LU Q, XU T T, et al. Extraction process of *Alsophila spinulosa* by response surface methodology and preliminary study of the activity [J]. The Food Industry, 2024, 45(11): 77−82.]
[30] TANG Z, LIN W, YANG J, et al. Ultrasound-assisted extraction of *Cordyceps cicadae* polyphenols: Optimization, LC-MS characterization, antioxidant and DNA damage protection activity evaluation[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2022, 15(8): 103953.
[31] AL-DHABI N A, PONMURUGAN K. Microwave assisted extraction and characterization of polysaccharide from waste jamun fruit seeds[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 1157−1163.
[32] 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.

［33］ ZHANG T, ZHOU H, FU Y, et al. Short-time hydrothermal treatment of poplar wood for the production of a lignin-derived polyphenol antioxidant[J]. Chem Sus Chem, 2020, 13(17): 4478−4486.
［34］ YAN Z, ZHONG Y, DUAN Y, et al. Antioxidant mechanism of tea polyphenols and its impact on health benefits[J]. Animal Nutrition, 2020, 6(2): 115−123.
［35］ RUMPF J, BURGER R, SCHULZE M. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123470.
［36］ WOOTTON-BEARD P C, MORAN A, RYAN L. Stability of the total antioxidant capacity and total polyphenol content of 23 commercially available vegetable juices before and after *in vitro* digestion measured by FRAP, DPPH, ABTS and Folin–Ciocalteu methods[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 217−224.
［37］ CHEN J, ZHAO M, ZHANG X H, et al. LC–MS guided isolation of phenolic glycosides from *Viburnum luzonicum* Rolfe leaves and their α-amylase and α-glucosidase inhibitory activities[J]. Natural Product Research, 2023.
［38］ YU M, ZHU S, HUANG D, et al. Inhibition of starch digestion by phenolic acids with a cinnamic acid backbone: Structural requirements for the inhibition of α-amylase and α-glucosidase[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137499.
［39］ LIU H, ZHENG C, LI Z, et al. Inhibitory mechanism of phenolic compounds in rapeseed oil on α-amylase and α-glucosidase: Spectroscopy, molecular docking, and molecular dynamic simulation[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 289: 122251.
［40］ 代嫚婷, 宋静, 余潇, 等. 海黄牡丹不同部位的成分分析、体外抗氧化能力及其 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶抑制能力[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 190−198. ［DAI M T, SONG J, YU X, et al. The phytochemical profiling, antioxidant capacity, α-glucosidase and α-amylase inhibition abilities of different parts of *Paeonia suffruticosa* 'Hai Huang'[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 190−198.］
［41］ YE C, ZHANG R, DONG L, et al. α-Glucosidase inhibitors from brown rice bound phenolics extracts (BRBPE): Identification and mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131306.
［42］ ZHANG M, XU Y, XIANG J, et al. Comparative evaluation on phenolic profiles, antioxidant properties and α-glucosidase inhibitory effects of different milling fractions of foxtail millet[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103217.
［43］ ELHUSSEINY S M, EL-MAHDY T S, AWAD M F, et al. Proteome analysis and *in vitro* antiviral, anticancer and antioxidant capacities of the aqueous extracts of *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus* Edible mushrooms[J]. Molecules, 2021, 26: 4623.
［44］ YAO F, GAO H, YIN C M, et al. Evaluation of *in vitro* antioxidant and antihyperglycemic activities of extracts from the lion's mane medicinal mushroom, *Hericium erinaceus* (Agaricomycetes)[J]. Int J Med Mushrooms, 2021, 23(3): 55−66.