

酶辅助超声提取杜香总多酚的工艺优化及降血糖活性研究

赵亭亭^{1,2}, 邱志濠^{1,2}, 张庆芬^{1,2}, 苑晓彤^{1,2}, 杨逢建^{1,2*}

¹东北林业大学, 森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

²东北林业大学化学化工与资源利用学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年5月6日; 发布日期: 2025年5月15日

摘 要

本文以杜香为原料, 采用酶辅助超声法提取杜香总多酚。在单因素实验基础上, 选择加酶量、超声功率、乙醇体积分数三个因素进行Box-Behnken响应面优化实验, 以杜香总多酚得率为响应值, 确定杜香多酚的最佳提取工艺, 并对提取的杜香多酚进行降糖降脂的活性研究。结果表明: 在加酶量为3%、超声功率300 W、乙醇体积分数为45%时, 杜香总多酚得率达 70.19 ± 0.31 mg/g, 与预测值 71.66 ± 0.19 mg/g高度吻合。当多酚浓度为5 mg/mL时, 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制率分别可达到80.1%和85.6%。这说明杜香多酚具有较好的降血糖生物活性, 该研究可为杜香多酚后续的研究开发提供理论依据。

关键词

杜香, 总多酚, 响应面, 酶辅助超声提取, 降血糖活性

Optimisation of Enzyme-Assisted Ultrasonic Extraction of Total Polyphenols from *Rhododendron tomentosum* Harmaja and Hypoglycaemic Activities

Tingting Zhao^{1,2}, Zhihao Qiu^{1,2}, Qingfen Zhang^{1,2}, Xiaotong Yuan^{1,2}, Fengjian Yang^{1,2*}

¹Key Laboratory of Forest Plant Ecology of the Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

²School of Chemistry, Chemical Engineering and Resource Utilization, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Apr. 2nd, 2025; accepted: May 6th, 2025; published: May 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 赵亭亭, 邱志濠, 张庆芬, 苑晓彤, 杨逢建. 酶辅助超声提取杜香总多酚的工艺优化及降血糖活性研究[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 348-360. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143040

Abstract

In this study, the total polyphenols were extracted by enzyme-assisted ultrasonography from the *Rhododendron tomentosum* Harmaja. On the basis of single factor experiments, the Box-Behnken response surface optimization experiment was carried out by selecting three factors: enzyme amount, ultrasonic power and ethanol volume fraction. The optimal extraction process was determined by taking the yield of total polyphenols as response value. The antioxidant and hypoglycemic activities of the extracted polyphenols were studied. The results showed that under the conditions of 3% enzyme dosage, 300 W ultrasonic power and 45% ethanol volume fraction, the yield of total polyphenols reached 70.19 ± 0.31 mg/g, which was highly consistent with the predicted value of 71.66 ± 0.19 mg/g. When the polyphenol concentration was increased to 5 mg/mL, the inhibition rates of α -amylase and α -glucosidase reached 80.1% and 85.6%, respectively. This suggests that polyphenols have better hypoglycemic biological activities. This study can provide a theoretical basis for the subsequent research and development of polyphenols.

Keywords

Rhododendron tomentosum Harmaja, Total Polyphenol, Response Surface, Enzyme-Assisted Ultrasonic Extraction, Hyperglycemic Activity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

杜香(*Rhododendron tomentosum* Harmaja), 为杜鹃花科(Ericaceae)杜香属(Esculenta)的常绿直立小灌木, 高 50~80 cm, 主要分布在朝鲜、北美、欧洲以及我国东北的大、小兴安岭和长白山等地区[1]。其为大兴安岭林区的主要植物种, 资源丰富[2]。在中国、日本和韩国等国家, 杜香被广泛应用于烹饪, 其叶子可以作为调味料, 在炖汤、焖肉等菜肴中加入, 增添香气和口味; 也可以加入凉菜、腌制食品或制作草药茶等[3]。已有研究表明, 杜香的化学成分十分丰富, 含挥发油、黄酮类、香豆精类、酚酸类等成分[4]。现代药理学表明, 杜香具有抗炎抑菌、镇咳祛痰、抗肿瘤、抗氧化等功效[5]。多酚类化合物是植物体内一种重要的次生代谢物质, 具有降血糖[6]、抗氧化[7]、抗炎[8]、抗癌[9]及抗肿瘤[10]等作用。然而, 目前对于杜香的研究主要聚焦于其挥发油领域, 而有关杜香中的多酚类物质的报道却相对较少, 这在很大程度上限制了杜香资源的广泛应用。

目前, 多酚类物质常用的提取方法主要有冷凝回流法、有机溶剂萃取法、酶解法、超声波辅助法等。冷凝回流法存在提取时间过长, 温度过高可能导致多酚受热分解等弊端[11]; 有机溶剂萃取的方法, 虽然操作简单, 但容易残留有机溶剂[12]; 酶解法虽高效, 但反应时间过长, 并且长时间处理会造成经济成本增加[13]; 超声法是通过空化效应和机械效应, 破坏植物的细胞结构, 从而使细胞内的有效成分加速溶出, 具有高效快速等特点。在植物中, 细胞壁会阻碍细胞内多酚类化合物的溶出[14], 进而对多酚类物质的提取造成影响。因此, 在提取过程中加入纤维素酶, 能够改变细胞壁的通透性, 通过对植物进行处理, 从而提高总多酚的得率。将超声法和酶解法相结合应用于杜香多酚的提取, 具有显著优势。一方面, 超声的空化和机械作用能够使植物细胞结构变得疏松, 增加酶与底物的接触面积; 另一方面, 酶解法可以特异性地分解细胞壁成分, 进一步提升细胞壁的通透性。两者协同作用, 更有效地促进了杜香中活性物质

的溶出,同时兼具高效[15]、绿色的特点[16]。

本实验通过纤维素酶辅助超声的方法提取杜香多酚,并通过单因素和响应面实验确定最佳提取工艺。通过 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制实验对杜香多酚的降血糖活性进行初步研究,从而为杜香的开发利用提供理论基础,为后续多酚类物质的应用提供依据。

2. 材料和方法

2.1. 实验材料与仪器

杜香:采自大兴安岭呼中区,新鲜叶片放置 50℃烘箱,烘干后粉碎,过 60 目筛,将样品密封,装袋备用。福林酚、纤维素酶、PNPG、 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶:上海源叶生物科技有限公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS):北京索莱宝科技有限公司;没食子酸:上海麦克林生化科技有限公司。

Tecan Spark 多功能微孔板检测仪;FWJ-10 高速多功能粉碎机;Neo15 高速冷冻离心机;101-3A 电热鼓风干燥箱;RE-501 旋转蒸发仪。

2.2. 实验方法

将烘干后的杜香粉碎,过筛,称取 1 g 杜香粉末于 50 mL 的避光离心管中,按一定比例加入质量分数为 3%的纤维素酶,以料液比 1:20 g/mL,加入 20 mL 45%的乙醇溶液,在超声仪中提取温度 55℃,超声功率 300 W 条件下,提取 40 min。提取结束后,离心取上清液,得到杜香总多酚提取液。

2.2.1. 杜香总多酚得率的计算

参考谭晓舒[17]等(Folin-Ciocalteu FC)方法稍作修改,对杜香总多酚进行标准曲线的绘制:精确称量没食子酸标准品于棕色容量瓶中定容,配制没食子酸溶液,分别取 1 mL 浓度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mg/mL 的标准溶液于 10 mL 避光离心管中,依次向管中加入 1 mL 10%福林酚溶液与之混合,避光条件下静置 5 min 后,加入 1 mL 10% Na_2CO_3 溶液混匀,将反应体系放于水浴锅中,40℃条件下水浴 1 h。待冷却至室温,在紫外波长 765 nm 处测得吸光值,以自变量没食子酸浓度(mg/mL)为横坐标,因变量吸光值 y 为纵坐标,经线性拟合,得到标准曲线: $y = 26.955x - 0.0093$ ($R^2 = 0.9992$),总多酚得率(mg/g)与吸光值呈良好的线性关系。总多酚的测定及得率的计算如下式。

$$W = \frac{c \times V \times N}{m}$$

式中: W 表示杜香总多酚得率, mg/g; c 表示多酚浓度, mg/mL; N 表示溶液的稀释倍数; V 表示多酚溶液定容后的体积, mL; m 表示杜香粉末质量, g。

2.2.2. 单因素实验

采用控制变量法,分别考察不同料液比(1:10、1:20、1:30、1:40、1:50 g/mL),加酶量(0%、1.5%、3%、4.5%、6%),乙醇体积分数(30%、45%、60%、75%、90%),超声功率(100、200、300、400、500 W),提取温度(35℃、45℃、55℃、65℃、75℃),超声时间(20、30、40、50、60 min),对提取杜香总多酚得率的影响。

2.2.3. 响应面优化试验

根据单因素实验结果,选取对杜香总多酚得率影响较为显著的因素,以加酶量(A)、超声功率(B)和乙醇体积分数(C)三个因素为自变量,通过 Box-Behnken 中心组合法构建三因素三水平优化模型,以杜香总多酚得率(Y)为响应值,使用 Design expert 10 软件对各因素之间的交互作用进行分析。试验因素与水平设计如表 1 所示。

Table 1. Box-Behnken test factor-level design
表 1. 响应面试验因素水平设计

水平	因素		
	A 加酶量(%)	B 超声功率(W)	C 乙醇体积分数(%)
-1	1.5	200	30
0	3	300	45
1	4.5	400	60

2.2.4. 与其他提取方法的比较

参考徐华琳[18]等的方法稍作修改，在料液比 1:20 g/mL，体积分数 45%乙醇溶液，超声功率 300 W，温度 55℃，提取时间 40 min 的条件下，分别采用冷凝回流法、超声法、酶解法和酶辅助超声法提取杜香总多酚，并计算不同提取方法下的杜香总多酚得率。

2.2.5. 杜香多酚体外降血糖活性的测定

在最佳提取工艺条件下得到杜香总多酚粗提液，采用 AB-8 型大孔树脂对其进行吸附，去离子水清洗后，用体积分数为 70%乙醇溶液对吸附后的大孔树脂进行洗脱，收集洗脱液，旋转蒸发至无醇味后，冷冻干燥，得到杜香总多酚提取物，分别对其进行 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶抑制实验。

杜香总多酚对 α-淀粉酶活性的抑制作用。参考姜荣华[19]等方法稍作修改，取不同浓度的多酚溶液 0.5 mL 与 0.5 mL α-淀粉酶溶液(1 U/mL)混合，37℃水浴 15 min。然后加入 1 mL 1%淀粉溶液，在相同条件下水浴 10 min。最后再加入 1 mL DNS 试剂，沸水浴反应 15 min，反应结束后，在紫外波长 540 nm 处测得吸光值，阿卡波糖为阳性对照组，计算抑制率的方法如下：

$$\text{抑制率} = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100\%$$

式中：A₁ 为实验组吸光值；A₂ 为背景组吸光值；A₀ 为对照组吸光值；

杜香总多酚对 α-葡萄糖苷酶活性的抑制作用。参照 PARK [20]等方法，将 PBS (pH 6.9)配制成溶液浓度为 0.1 mmol/L，分别取 50 uL 质量浓度为 1、2、3、4、5 mg/mL 的多酚溶液与 50 μL α-葡萄糖苷酶 (0.2 U/mL)溶液混合，室温下反应 6 min，加入 5 mmol/L pNPG 溶液 50 μL，继续反应 10 min 后，取 100 uL Na₂CO₃ 溶液(0.2 mol/L)与之混合后反应终止，在紫外波长 405 nm 处测得吸光值，阿卡波糖为阳性对照组。计算抑制率的方法如下：

$$\text{抑制率} = \left(1 - \frac{A_0 - A_1}{A_2 - A_3} \right) \times 100\%$$

式中：A₀：实验组吸光值；A₁：背景吸光值；A₂：阴性对照吸光值；A₃：阴性对照背景吸光值。

2.3. 数据处理

本研究所有实验均平行重复三次，试验结果用平均数 ± 标准差表示。采用软件 Origin 2021 进行绘图，软件 Design Expert 10、SPSS Statistics 26 对数据进行处理分析。

3. 实验结果与分析

3.1. 单因素试验结果

3.1.1. 加酶量对杜香总多酚得率的影响

加酶量对杜香总多酚得率的影响如图 1 所示，在加酶量在 0%~6%范围内，随着加酶量的增加，杜香

总多酚得率呈现先上升后下降的趋势。加酶量从 0% 增加到 3%，杜香总多酚提取率逐渐增加，在加酶量为 3% 时，杜香总多酚得率达到最大值。在一定范围内，随着纤维素酶量的增加，对细胞壁的破坏能力也随之增加，能够更有利于杜香多酚的溶出，从而使溶液中的杜香多酚含量增加。由于细胞壁中的粗纤维已经在加酶量为 3% 时充分反应，所以当纤维素酶量继续增加时，总多酚得率不再有明显变化，可能是因为底物与纤维素酶的酶解反应已经达到了饱和状态。故选择质量分数为 3% 的纤维素酶量进行后续实验优化。

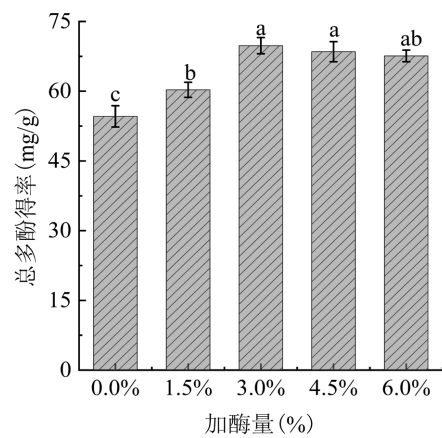


Figure 1. Influence of enzyme dosage on the yield of total polyphenols in *Rhododendron*
图 1. 加酶量对杜香总多酚得率的影响

3.1.2. 乙醇体积分数对杜香总多酚得率的影响

乙醇体积分数对杜香总多酚得率的影响如图 2 所示，乙醇体积分数从 35% 到 45% 杜香总多酚得率增加，并且在乙醇体积分数为 45% 时杜香总多酚得率达到最大值 68.7 ± 0.81 mg/g，杜香多酚可最大程度的溶出。继续增加乙醇的体积分数，杜香总多酚得率随着乙醇体积分数的增加逐渐降低。乙醇分数增加时，一方面溶剂的极性等性质发生改变，使多酚类物质溶解度降低；另一方面可能会使一些杂质的溶解度增大，从而与多酚竞争溶剂中的溶解空间，进而影响多酚得率，故选择 45% 乙醇为最佳体积分数。

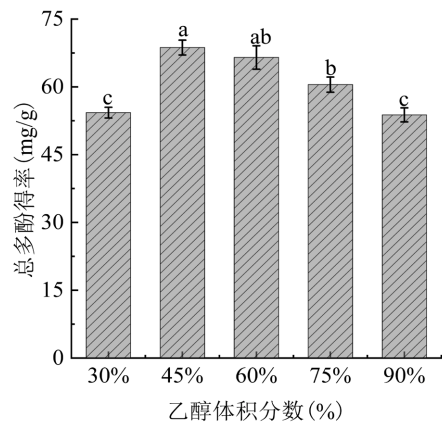


Figure 2. Influence of ethanol volume fraction on the yield of total polyphenols in *Rhododendron*
图 2. 乙醇体积分数对杜香总多酚得率的影响

3.1.3. 提取温度对杜香总多酚得率的影响

从图 3 可以看出，在提取温度 35℃~75℃ 范围内，杜香总多酚得率呈先上升后下降的趋势。当提取

温度从 35℃ 升高到 55℃ 时, 杜香总多酚得率不断增加, 并且在 55℃ 时杜香总多酚得率达到最大值。随着提取温度的提高, 分子运动不断增强, 多酚类物质更容易扩散到溶剂中, 从而使溶液中的多酚类物质含量有所增加。由于多酚类物质化学结构不稳定, 随着提取温度继续增加, 提取温度过高, 导致物质结构发生改变, 使多酚氧化分解, 从而造成总多酚得率降低。故选择 55℃ 为最佳提取温度。

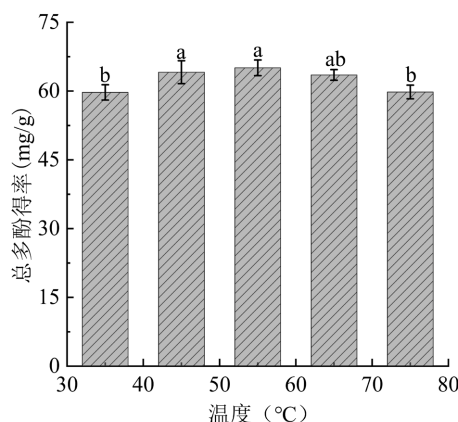


Figure 3. Influence of extraction temperature on the yield of total polyphenols in *Rhododendron*

图 3. 提取温度对杜香总多酚得率的影响

3.1.4. 料液比对杜香总多酚得率的影响

从如图 4 可以看出, 在料液比 1:10~1:50 g/mL 的范围内, 随着料液比的增加, 杜香总多酚得率也随之增加, 料液比为 1:20 g/mL 时得率达到峰值(68.4 ± 1.17 mg/g), 但料液比超过 1:20 g/mL 后, 杜香总多酚得率不再有明显变化。随着料液比逐渐增大, 溶剂增加, 使杜香多酚原料与溶剂的接触面积相对增加, 进而使溶液中的杜香总多酚含量增加。这是因为增大溶剂的量后, 会使多酚溶液浓度降低, 浓度差变大, 从而加快了杜香多酚从原料到水中的扩散速度; 但是当溶剂增加到一定量后, 杜香多酚基本溶出, 得率不再有明显变化。故选择 1:20 g/mL 为最佳料液比。

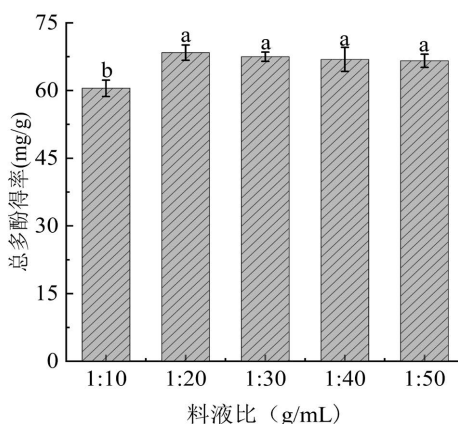


Figure 4. Influence of solid/liquid ratio on the yield of total polyphenols in *Rhododendron*

图 4. 料液比对杜香总多酚得率的影响

3.1.5. 超声功率对杜香总多酚得率的影响

如图 5 所示, 超声功率从 100 W 升高到 300 W 时, 杜香总多酚得率逐渐增加, 超声功率达到 300 W

时杜香总多酚得率达到最大值。随着超声功率的增加, 超声能力增强, 有效地增加了细胞壁等结构的破碎速度, 使多酚更容易从细胞中释放并溶解出来, 使溶液中总多酚含量增加。但随着超声功率继续增大, 杜香总多酚得率下降。超声功率过大, 会使局部温度过高压力发生变化, 杜香多酚不稳定而被破坏, 从而使杜香总多酚得率减少。故选择 300 W 为最佳超声功率。

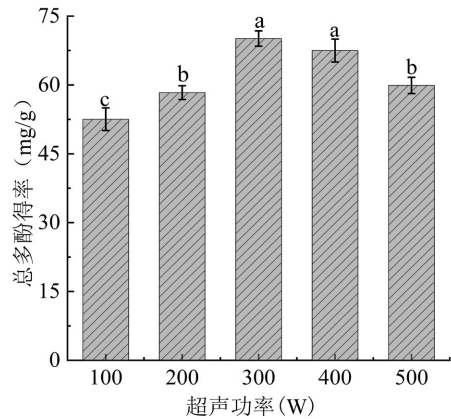


Figure 5. Influence of ultrasonic power on the yield of total polyphenols in *Rhododendron*
图 5. 超声功率对杜香总多酚得率的影响

3.1.6. 超声时间对杜香总多酚得率的影响

如图 6 所示, 在超声时间 20 min~60 min 范围内, 杜香总多酚得率随着超声时间增加呈先升高后降低趋势。在超声时间 40 min 时, 杜香总多酚得率达到峰值, 随着超声时间延长, 杜香总多酚得率开始下降, 这种情况可能是由于机械波的作用时间过长, 导致多酚特殊基团受到破坏, 使杜香总多酚得率降低。故选择 40 min 为最佳超声时间。

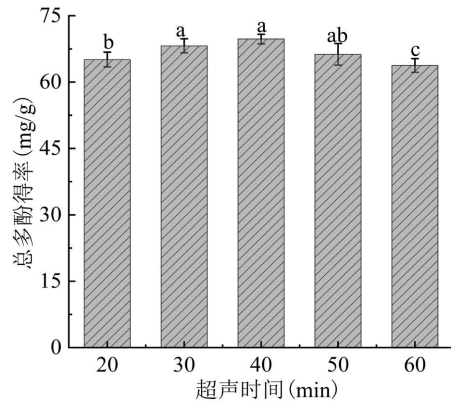


Figure 6. Influence of ultrasound time on the yield of total polyphenols in *Rhododendron*
图 6. 超声时间对杜香总多酚得率的影响

3.2. 响应面法优化试验设计及结果分析

3.2.1. 响应面模型的建立与显著性检验

在单因素试验的基础上, 试验以加酶量、超声功率、乙醇体积分数为自变量, 进行三因素三水平的 Box-Behnken 中心组合法优化杜香多酚提取工艺, 实验设计与结果如表 2 所示。

Table 2. Response surface optimisation test factor design and results**表 2.** 响应面优化试验因素设计及结果

编号	A 加酶量(%)	B 超声功率(W)	C 乙醇体积分数(%)	总多酚提取率(mg/g)
1	4.5	300	30	68.7 ± 0.13
2	3	300	45	71.68 ± 0.08
3	1.5	200	45	65.31 ± 0.08
4	3	300	45	71.45 ± 0.16
5	3	200	60	67.69 ± 0.25
6	3	200	30	65.4 ± 0.06
7	4.5	200	45	67.97 ± 0.03
8	4.5	400	45	66.89 ± 0.25
9	4.5	300	60	66.89 ± 0.04
10	3	400	30	68.46 ± 0.17
11	3	300	45	71.57 ± 0.31
12	3	300	45	71.65 ± 0.06
13	1.5	300	60	68.69 ± 0.16
14	3	300	45	71.78 ± 0.08
15	1.5	400	45	68.76 ± 0.53
16	1.5	300	30	66.54 ± 0.03
17	3	400	60	67.12 ± 0.14

响应面实验结果如表 2 所示, 使用软件 Design-Expert 10 对数据进行回归分析, 得到二次多项回归方程: $Y = 71.63 + 0.1437A + 0.6075B + 0.1612C - 1.13AB - 0.099AC - 0.9075BC - 1.93A^2 - 2.47B^2 - 1.99C^2$ 。其中, Y 为杜香总多酚得率, A 为加酶量, B 为超声功率, C 为乙醇体积分数。

3.2.2. 响应面回归模型的方差分析

方差分析结果如表 3 所示, 由表 3 可知, 模型的 $P < 0.001$, 说明回归方程极显著, 同时失拟项 $P = 0.3318 > 0.05$, 说明差异性不显著, 说明了该模型拟合程度较好, 可靠性较高, 能够很好的对杜香总多酚得率进行预测。表中 B 、 AB 、 AC 、 BC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 的 P 值均小于 0.001, 说明对杜香总多酚得率的影响极显著; 其中 F 值是评价各种影响因素重要性的参考指标, 即 F 值越大, 说明该因素对实验结果影响越大[21]。通过比较下表中 F 值的大小可知, B (超声功率) $> C$ (乙醇体积分数) $> A$ (加酶量), 说明超声功率对杜香总多酚得率影响最大。而 A (加酶量) 和 C (乙醇体积分数) 对杜香总多酚得率也具有一定的影响。

Table 3. Response surface fitted regression equation analysis of variance results**表 3.** 响应面拟合回归方程方差分析结果

来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
模型	80.34	9	8.93	470.72	<0.0001**
A	0.1653	1	0.1653	8.72	0.0213*
B	2.95	1	2.95	155.69	<0.0001**
C	0.2080	1	0.2080	10.97	0.0129*
AB	5.13	1	5.13	270.53	<0.0001**
AC	3.92	1	3.92	206.73	<0.0001**

续表

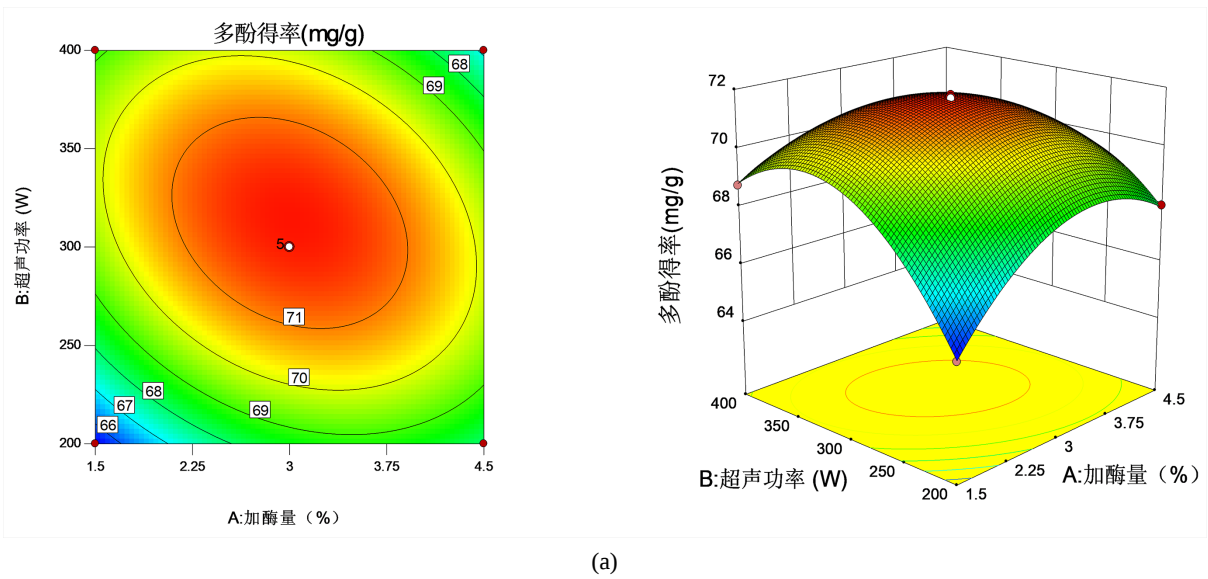
BC	3.29	1	3.29	173.71	<0.0001**
A ²	15.65	1	15.65	825.34	<0.0001**
B ²	25.59	1	25.59	1349.67	<0.0001**
C ²	16.72	1	16.72	881.92	<0.0001**
残差	0.1327	7	0.0190		
失拟项	0.0714	3	0.0238	1.55	0.3318
总离差	0.0613	4	0.0153		
合计	80.47	16			

注：“*”表示差异显著 $0.01 < P < 0.05$ ，“**”表示差异极显著 $P < 0.01$ 。

3.2.3. 各因素间的交互作用

变量之间的交互作用可通过响应面 3D 图像的陡峭程度和等高线来反映[22]。当响应面 3D 图像坡度越陡峭，等高线图像形状趋于椭圆形时，说明这二者之间的交互作用越强，对杜香总多酚得率的影响越大；反之，响应面 3D 图像的坡度越平缓，等高线图像形状趋于圆形时，说明二者之间的交互作用越弱[23]。

根据下图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)中可以清晰地看出各因素之间的交互作用。图 a 中随着超声功率的增加，杜香总多酚的得率呈先上升后下降的趋势，随着纤维素酶量的增加，杜香总多酚得率也呈先升高后下降的趋势。图中 B 面的弯曲程度要大于 A 面的弯曲程度，说明超声功率对杜香总多酚得率的影响大于加酶量，等高线图像呈椭圆形，说明超声功率与加酶量之间的交互作用显著；从图 b 中可以看到，随着超声功率增加，多酚得率先增加后下降，随着乙醇体积分数增加，多酚得率增加后下降。但图中 B 面的弯曲程度要大于 C 面的弯曲程度，说明超声功率对多酚得率的影响大于乙醇体积分数对多酚得率的影响，同时图中的等高线图像呈椭圆形，说明超声功率和乙醇体积分数之间交互作用较显著；从图 c 中可以看出，随着乙醇体积分数和加酶量的增加，二者的杜香总多酚得率都呈先增后减的变化趋势。并且，图 c 中 A 面的弯曲程度与 C 面的弯曲程度相近，等高线图像呈圆形，说明加酶量与乙醇体积分数之间的交互作用不显著。



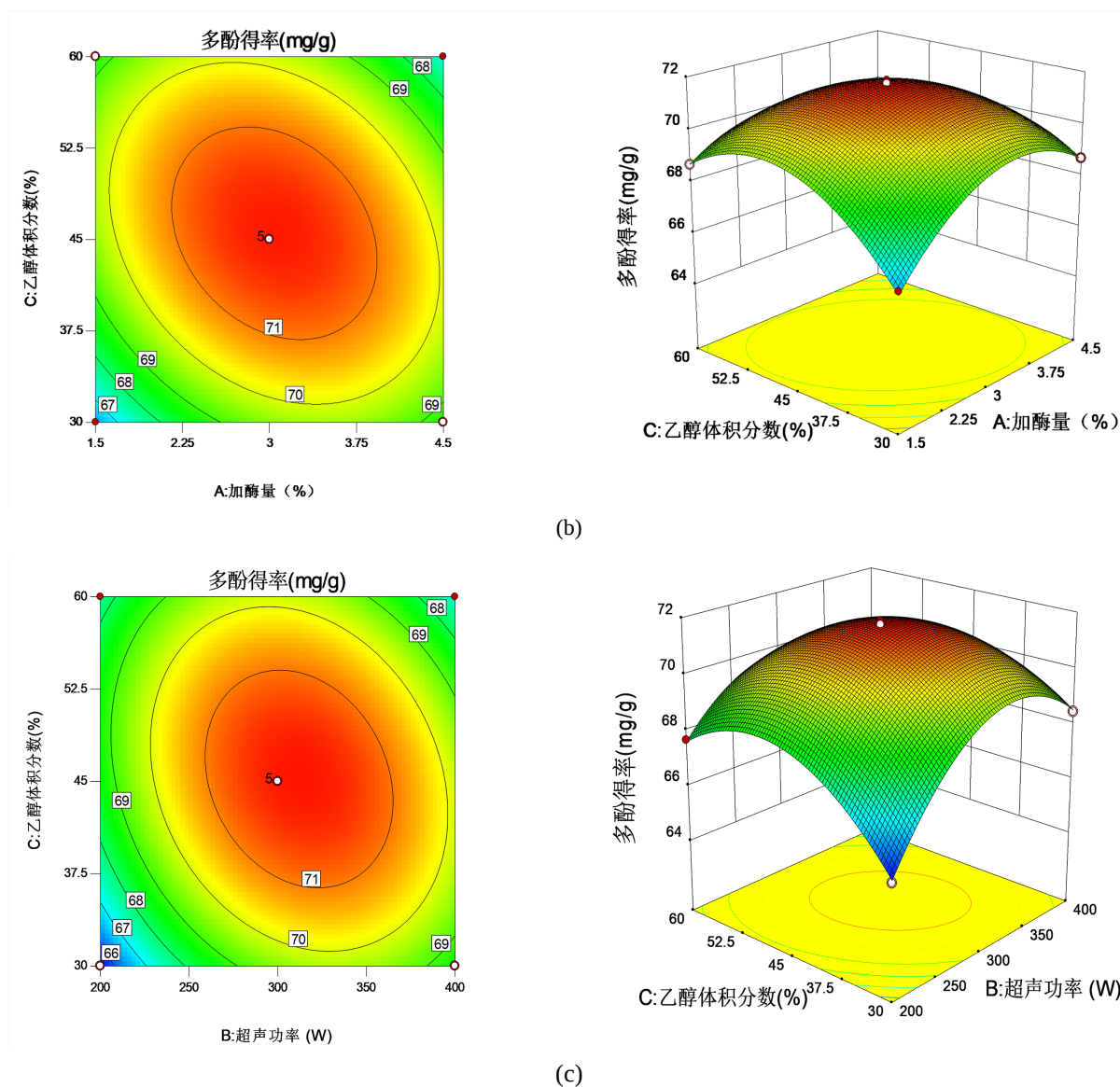


Figure 7. Interactive Response surface 3D and contour plots

图 7. 交互作用的响应面 3D 图和等高线图

3.3. 最佳工艺条件实验验证

根据响应面回归方程模型预测杜香总多酚的最佳提取工艺：加酶量为 2.99%，超声功率为 312.15 W、乙醇体积分数为 45.19%。为了操作方便，最终调整为：加酶量 3%、超声功率 300 W、乙醇体积分数 45%。重复三次平行试验，得到总多酚得率为 70.19 ± 0.31 mg/g，与模型预测值 71.66 ± 0.19 mg/g 相近，说明该模型在实际使用中具有一定的可行性。

3.4. 与其他提取方法的比较

由表 4 可知，通过不同的方法对杜香总多酚进行提取，对总多酚得率的数据对比分析发现，酶辅助超声法提取的杜香总多酚得率普遍高于冷凝回流法、酶解法和超声法。这表明酶辅助超声法提取是一种结合了酶解法和超声法的技术，可促进目标物质的快速溶出，具有效率高、操作简便、环保[24]等优点。

Table 4. Comparison of Polyphenol content in different extraction methods
表 4. 不同提取方法总多酚得率比较

提取方法	料液比(g/mL)	乙醇体积分数(%)	时间(min)	总多酚得率(mg/g)
冷凝回流法	1:20	45	180	45.41 ± 0.61 ^c
酶解法	1:20	45	40	43.24 ± 0.35 ^d
超声法	1:20	45	40	52.12 ± 1.2 ^b
酶辅助超声法	1:20	45	40	69.15 ± 1.13 ^a

3.5. 杜香多酚体外降糖降脂活性的测定

3.5.1. 杜香多酚对 α -淀粉酶的抑制作用

α -淀粉酶不仅是一种参与碳水化合物分解的关键酶，同时在调控血糖水平方面也发挥着关键作用。研究表明，通过对 α -淀粉酶活性的抑制，可以减缓淀粉类食物的降解过程，进而减缓对淀粉类食物中葡萄糖的吸收，从而抑制血糖的升高[25]。图 8 中，不同浓度的杜香多酚溶液对 α -淀粉酶均具有一定的抑制作用，多酚溶液浓度越高，对 α -淀粉酶的抑制作用越强。当多酚溶液浓度 1~4 mg/mL 时，抑制率快速变化；多酚溶液浓度在 4~5 mg/mL 时抑制率缓慢增加，在 5 mg/mL 时 α -淀粉酶的抑制率达到 80.1%，阿卡波糖对其的抑制率达到 90.1%。这说明杜香多酚对 α -淀粉酶具有一定的抑制作用。

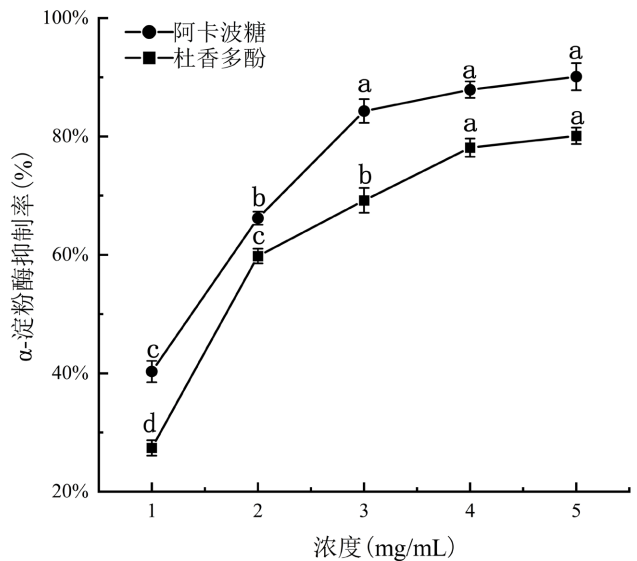


Figure 8. Inhibitory rates of α -amylase in acarbose and polyphenol extracts
图 8. 阿卡波糖和多酚提取物对 α -淀粉酶的抑制率

3.5.2. 杜香多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

α -葡萄糖苷酶作为碳水化合物代谢途径中的重要水解酶[26]，该酶是促进碳水化合物底物消化和吸收的一种关键消化酶。因此可以通过抑制抑制 α -葡萄糖苷酶的活性从而抑制血糖升高，可用于对II型糖尿病的治疗[27]。图 9 中，不同浓度的多酚溶液对 α -葡萄糖苷酶均具有一定的抑制作用，在 1~5 mg/mL 浓度范围内，杜香多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力随着浓度的增大呈上升趋势。多酚溶液浓度在 0~3 mg/mL 时，抑制率变化最大；多酚溶液浓度在 3~5 mg/mL 时缓慢升高，在 5 mg/mL 时 α -葡萄糖苷酶的抑制率达到 85.6%，阿卡波糖的抑制率为 89.9%。这说明杜香多酚对 α -葡萄糖苷酶有较好的抑制作用。

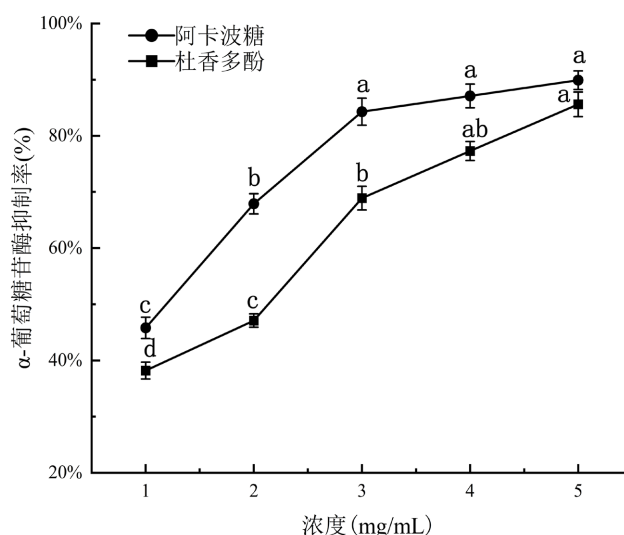


Figure 9. Inhibition rates of α -glucosidase in acarbose and polyphenol extracts
图 9. 阿卡波糖和多酚提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制率

4. 结论

本研究利用纤维素酶辅助超声提取杜香总多酚，并对其进行工艺优化及降血糖活性研究。在单因素实验的基础上，采用 Box-Behnken 响应面法进行三因素三水平实验。实验结果表明，杜香总多酚的最佳提取条件为：料液比 1:20 g/mL、加酶量 3%、乙醇体积分数 45%、超声功率 300 W、提取温度 55℃、提取时间 40 min，在该条件下提取杜香总多酚得率为 70.19 ± 0.31 mg/g。此外，通过体外活性实验发现，杜香多酚对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶均有一定的抑制效果，这表明杜香多酚具有较好的降糖降脂功效。上述研究结果为杜香多酚的开发利用提供了理论依据。

基金项目

大兴安岭呼中区政府资助项目(2023230001000031)。

参考文献

- [1] Dampc, A. and Luczkiewicz, M. (2013) *Rhododendron tomentosum* (*Ledum palustre*). A Review of Traditional Use Based on Current Research. *Fitoterapia*, **85**, 130-143. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2013.01.013>
- [2] 冯旭, 周勇, 郭立新. 黑龙江省野生香料植物资源及其利用[J]. 国土与自然资源研究, 1995(2): 68-72.
- [3] 冯慧敏, 刘微. 大兴安岭林下经济植物兴安杜鹃和杜香的开发应用探讨[J]. 南方农业, 2023, 17(18): 221-224.
- [4] 马雪梅. 资源植物杜香的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 2949-2950.
- [5] Vengrytė, M. and Raudonė, L. (2024) Phytochemical Profiling and Biological Activities of *Rhododendron* Subsect. *Ledum*: Discovering the Medicinal Potential of Labrador Tea Species in the Northern Hemisphere. *Plants*, **13**, Article No. 901. <https://doi.org/10.3390/plants13060901>
- [6] 费鹏, 赵胜娟, 陈曦, 等. 植物多酚抑菌活性、作用机理及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 226-230.
- [7] 任章成, 郭泽美, 李乐, 等. 植物多酚生物活性研究进展[J]. 现代食品, 2023, 29(22): 108-110.
- [8] 赵盈, 於天, 郑志刚, 等. 多酚在植物中的分布及其生物活性研究进展[J]. 中草药, 2023, 54(17): 5825-5832.
- [9] 裴河欢, 张美凤, 覃洋琛, 等. 多酚类化合物药理作用研究进展[J]. 中国药业, 2022, 31(23): 124-127.
- [10] 周爽, 黄莉, 王彦美, 等. 植物多酚的生物利用度及其降血糖活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(6): 211-217.
- [11] 焦健双, 董晓丹, 邱斌, 等. 油菜籽的加工现状与研究趋势[J]. 食品科技, 2024, 49(6): 187-193.

- [12] 崔艳平, 聂玮, 迟晓君, 等. 食品中多酚类化合物提取方法的研究进展[J]. 山东农业工程学院学报, 2021, 38(1): 31-35.
- [13] 郑贤明. 橄榄叶多酚提取纯化及抗氧化活性的研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [14] Oroian, M., Ursachi, F. and Dranca, F. (2020) Ultrasound-Assisted Extraction of Polyphenols from Crude Pollen. *Antioxidants*, **9**, Article No. 322. <https://doi.org/10.3390/antiox9040322>
- [15] 闫帅帅, 晋程妮, 武颖, 等. 枸杞叶多酚的超声辅助酶法提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 山西农业科学, 2023, 51(9): 1060-1068.
- [16] Wang, H., Tong, Y., Li, W., Zhang, X., Gao, X., Yong, J., et al. (2017) Enhanced Ultrasound-Assisted Enzymatic Hydrolysis Extraction of Quinolizidine Alkaloids from *Sophora alopecuroides* L. Seeds. *Journal of Natural Medicines*, **72**, 424-432. <https://doi.org/10.1007/s11418-017-1165-7>
- [17] 谭晓舒, 吴建文, 梨贵卿, 等. 火麻仁油总酚含量福林酚测定法的优化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 166-173.
- [18] 徐华琳, 秦令祥, 丁昱婵, 等. 微波辅助低共熔溶剂提取杜仲雄花黄酮工艺优化及抗疲劳作用研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(11): 93-100.
- [19] 姜荣华, 蒲铎文, 樊梓鸾, 等. 老山芹多糖的分离纯化、结构表征及体外降糖活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 113-118+124.
- [20] Park, S.R., Kim, J.H., Jang, H.D., Yang, S.Y. and Kim, Y.H. (2018) Inhibitory Activity of Minor Phlorotannins from *Ecklonia Cava* on α -Glucosidase. *Food Chemistry*, **257**, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.013>
- [21] 黄磊磊, 刘佳怡, 王天怡, 等. 纤维素酶辅助超声提取丁香叶黄酮工艺优化及抗氧化性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 161-170.
- [22] Ahmad, A., Alkharfy, K.M., Wani, T.A. and Raish, M. (2015) Application of Box-Behnken Design for Ultrasonic-Assisted Extraction of Polysaccharides from *Paeonia emodi*. *International Journal of Biological Macromolecules*, **72**, 990-997. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.011>
- [23] 陈姗姗, 贾俊伟. 响应面法优化超声辅助提取荆芥中维生素 C 工艺[J]. 食品工业, 2024, 45(4): 13-16.
- [24] Lin, B., Wang, S., Zhou, A., Hu, Q. and Huang, G. (2023) Ultrasound-Assisted Enzyme Extraction and Properties of *Shatian pomelo* Peel Polysaccharide. *Ultrasonics Sonochemistry*, **98**, Article ID: 106507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106507>
- [25] 邢明霞, 谢凡, 艾连中. 滇橄榄鲜果中多酚提取物的降血糖机制研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(2): 1-11.
- [26] 康才洁, 张琪婧, 蒋晓敏, 等. 树莓干果多酚的闪式提取及抗氧化、降血糖活性[J]. 食品科技, 2025, 50(1): 197-205.
- [27] Kong, F., Qin, Y., Su, Z., Ning, Z. and Yu, S. (2018) Optimization of Extraction of Hypoglycemic Ingredients from Grape Seeds and Evaluation of α -Glucosidase and α -Amylase Inhibitory Effects *in Vitro*. *Journal of Food Science*, **83**, 1422-1429. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14150>