DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.16.015

铁皮石斛多糖及联苄类化合物分步提取工艺优化

肖志勇[1],林心怡[2],方丽金[1],梁玲[2],张梅[2*]
(1. 福建拓天生物科技有限公司,福建 福州 350001;2. 闽江大学 材料与化工学院,福建 福州 350108)

摘　要:为实现铁皮石斛多糖与联苄类化合物的分步高效提取,该研究采用单因素结合均匀设计法优化铁皮石斛多糖提取工艺;提取多糖后残渣直接用于铁皮石斛联苄类化合物的提取,在单因素试验基础上,采用响应面法优化联苄类化合物提取工艺。结果表明,多糖提取的最佳工艺条件为酶解温度 65 ℃、酶解时间 120 min、料液比 1∶45 (g/mL)、加酶量 1.5%,验证得到铁皮石斛多糖提取率为 33.69%;联苄类化合物提取的最佳工艺条件为超声时间 4 h、料液比 1∶20(g/mL)、乙醇体积分数 70%,验证得到铁皮石斛联苄类化合物提取率平均值为 3.71%。预测值与试验实际值相近,说明试验结果可靠,优化的提取工艺可行有效。

关键词:铁皮石斛;多糖;联苄类化合物;均匀设计;提取

Optimization of Sequential Extraction of Polysaccharides and Benzyl Compounds from *Dendrobium officinale*

XIAO Zhiyong[1], LIN Xinyi[2], FANG Lijin[1], LIANG Ling[2], ZHANG Mei[2*]
(1. Fujian Tuotian Biotechnology Co., Ltd., Fuzhou 350001, Fujian, China; 2. College of Materials and Chemical Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: To realize the efficient stepwise extraction of *Dendrobium officinale* polysaccharides and bibenzyl compounds, single-factor experiments combined with uniform design were employed in this study to optimize the extraction process of *D.officinale* polysaccharides. The residue obtained after polysaccharide extraction was directly reused for the extraction of bibenzyl compounds from *D. officinale*. On the basis of single-factor tests, response surface methodology was further applied to optimize the extraction technology of bibenzyl compounds. The results showed that the optimal conditions for polysaccharide extraction were enzymatic hydrolysis temperature of 65 ℃, enzymatic hydrolysis time of 120 min, solid-liquid ratio of 1∶45 (g/mL), and enzyme dosage of 1.5%. Under the verified conditions, the extraction rate of *Dendrobium officinale* polysaccharides reached 33.69%. The optimal conditions for the extraction of bibenzyl compounds were ultrasonic extraction time of 4 h, solid-liquid ratio of 1∶20 (g/mL), and ethanol volume fraction of 70%. Under verification experiments, the average extraction rate of bibenzyl compounds from *Dendrobium officinale* was 3.71%. The predicted values were in good agreement with the experimental measured values, which indicated that the experimental results were reliable and the optimized extraction process was feasible and effective.

Key words: *Dendrobium officinale*; polysaccharides; bibenzyl compounds; uniform design; extraction

引文格式:
肖志勇,林心怡,方丽金,等. 铁皮石斛多糖及联苄类化合物分步提取工艺优化[J]. 食品研究与开发,2026,47(16):122-129.
XIAO Zhiyong, LIN Xinyi, FANG Lijin, et al. Optimization of Sequential Extraction of Polysaccharides and Benzyl Compounds from *Dendrobium officinale*[J]. Food Research and Development, 2026, 47(16): 122-129.

基金项目:福建省科技计划项目(2024S0006、2024S0009);福州市科技计划项目(2024-SG-009)
作者简介:肖志勇(1979—),男(汉),教授级高级工程师,本科,研究方向:功能食品深加工。
*通信作者:张梅(1978—),女(汉),副教授,博士,研究方向:药食同源功能食品研究与开发。

铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura et Migo)为兰科石斛属多年生草本植物,是我国传统名贵药食同源中药材,在《中国药典》中被明确记载具有益胃生津、滋阴清热等作用[1-3]。现代药理研究表明,多糖作为铁皮石斛主要活性成分,具有增强免疫力、降血糖、抗肿瘤、清除自由基和减轻炎症等功效[4-8]。同时石斛酚、毛兰素等联苄类化合物作为铁皮石斛特征性活性成分,具有抗肿瘤、抗衰老、抗菌和降低血小板聚集等作用,尤其在宫颈癌、肝癌、肺癌等抗肿瘤疾病的预防与治疗中显示出潜在应用价值[9-12]。近年来,铁皮石斛作为一种药食两用的物质,已成为功能食品、保健品等领域的开发热点。

植物多糖一般采用水作为提取溶剂,而石斛酚、毛兰素等联苄类化合物则采用乙醇有机溶剂提取,两类化合物化学结构和理化性质不同,因此,铁皮石斛的多糖和联苄类化合物可实现"一物多提、梯级利用",即植物多糖经水提取后,留存在残渣中的联苄类化合物用有机溶剂精准提取,使铁皮石斛原料中的两类活性成分均得到充分提取。这种高值化利用模式,改变了传统铁皮石斛开发仅以多糖或仅以联苄类化合物为单一目标成分提取,提取后残渣被视为废弃物丢弃,造成铁皮石斛资源严重浪费的局面,改变了铁皮石斛资源"取一弃余"的粗放式开发格局,契合资源循环利用的发展趋势。

多糖提取过程中通过酶解或超声处理可破坏细胞壁的纤维素骨架,使细胞壁结构疏松多孔,同时多糖提取时的溶剂浸润的传质通道,可显著降低后续联苄类化合物的提取阻力,缩短提取时间、减少溶剂用量,实现"多糖提取-联苄提取"的工艺分步协同提取,解决了联苄类化合物因含量低、提取难度大导致的技术瓶颈。本研究以铁皮石斛为原料,聚焦铁皮石斛多糖与联苄类化合物的协同高效提取,系统探究提取过程中的影响因素,旨在建立一种提取率高、操作简便、绿色环保的联合提取工艺,以期为铁皮石斛多糖及联苄类化合物的工业化生产提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

铁皮石斛:霍山聚斛堂石斛有限公司;石斛酚标准品(纯度98%):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;果胶酶(≥50 U/mg)、木瓜蛋白酶(≥500 U/mg)、纤维素酶(≥50 U/mg)、风味酶(≥20 U/mg):上海源叶生物科技有限公司;葡萄糖标准品(纯度>98%)、浓硫酸、无水乙醇、苯酚(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BSA224S电子分析天平:赛多利斯(北京)仪器有限公司;Spark多功能酶标仪:帝肯(上海)实验器材有限公司;722型可见分光光度计:上海佑科仪器仪表有限公司;H1650-W高速台式离心机:湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;B220型恒温水浴锅:上海亚荣生化仪器厂;KQ-250B型超声波清洗器:昆山市超声仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 铁皮石斛多糖及联苄类化合物提取工艺流程

将铁皮石斛粉碎后过80目筛,以纯水为提取溶剂,在料液比1∶35(g/mL)、加酶量2.0%、酶解温度55 ℃、酶解时间120 min条件下提取多糖,测定多糖提取率;多糖提取后收集残渣,以乙醇溶液为提取溶剂,在料液比1∶20(g/mL)、超声时间4 h、乙醇体积分数60%条件下,提取铁皮石斛中联苄类化合物,测定联苄类化合物提取率。

1.3.2 铁皮石斛多糖提取工艺优化

1.3.2.1 单因素试验设计

分别考察酶种类(果胶酶、纤维素酶、木瓜蛋白酶和风味酶)、酶解时间(30、60、90、120、150 min)、加酶量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%)、料液比[1∶25、1∶35、1∶45、1∶55、1∶65(g/mL)]、酶解温度(35、45、55、65、75 ℃)对铁皮石斛多糖提取率的影响。多糖提取时各因素的固定水平为料液比1∶35(g/mL)、加酶量2.0%、酶解温度55 ℃、酶解时间120 min。

1.3.2.2 均匀试验设计

基于单因素试验结果,选择酶解温度、酶解时间、料液比、加酶量为自变量,以多糖提取率为指标,采用混合均匀设计法优化铁皮石斛多糖的提取工艺。均匀设计因素与水平见表1。

表1 均匀设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of uniform design

水平	X_1 酶解温度/℃	X_2 酶解时间/min	X_3 料液比/(g/mL)	X_4 加酶量/%
−1	55	90	1∶35	1.5
0	65	120	1∶45	2.0
1	75	150	1∶55	2.5

1.3.2.3 多糖提取率的测定

葡萄糖标准曲线的绘制:采用硫酸-苯酚法测定多糖的含量[13-14]。称取葡萄糖标准品配制成一定浓度的葡萄糖标准溶液,分别吸取葡萄糖标准溶液1.0 mL于具塞试管中,加入1.0 mL 5%苯酚溶液,再迅速加入5.0 mL浓硫酸5.0 mL,充分摇匀反应,于489 nm波长处测定吸光度。以吸光度为纵坐标、多糖浓度为横坐标绘制标准曲线,得到葡萄糖标准曲线的线性回归方程为 $y=13.126x+0.046\,6$,$R^2=0.999\,2$。

多糖提取率的计算:将样品按1.3.2.1和1.3.2.2试验条件提取多糖,4 000×*g* 离心10 min,取上清液稀释,按照标准曲线步骤反应,测定489 nm处的吸光度,代入标准曲线回归方程计算多糖浓度,依据如下公式计

算多糖提取率。

$$Y = \frac{C \times E \times V}{1\,000 \times M} \times 100$$

式中：Y 为多糖提取率，%；C 为多糖浓度，mg/mL；E 为稀释倍数；V 为提取液的体积，mL；M 为铁皮石斛干粉质量，g；1 000 为换算系数。

1.3.3 铁皮石斛联苄类化合物提取工艺优化

1.3.3.1 单因素试验设计

分别考察超声时间（1、2、3、4、5 h）、乙醇体积分数（30%、45%、60%、75%、90%）、料液比[1∶10、1∶15、1∶20、1∶25、1∶30（g/mL）]对联苄类化合物提取率的影响。联苄类化合物提取时各因素的固定水平为超声时间 4 h、料液比 1∶20（g/mL）、乙醇体积分数 60%。

1.3.3.2 响应面试验设计

基于单因素试验结果，选取超声时间、料液比、乙醇体积分数为自变量，以联苄类化合物提取率为响应值，采用 Box-Behnken 响应面法优化铁皮石斛联苄类化合物的提取工艺。响应面设计因素与水平见表 2。

表 2 响应面设计因素与水平

Table 2 Factors and levels of response surface design

水平	*A* 超声时间/h	*B* 料液比/(g/mL)	*C* 乙醇体积分数/%
−1	3	1∶15	45
0	4	1∶20	60
1	5	1∶25	75

1.3.3.3 联苄类化合物提取率的测定

石斛酚标准曲线的绘制：采用紫外分光光度计法测定铁皮石斛中联苄类化合物的含量[15]。称取石斛酚标准品配制成一定浓度的石斛酚标准溶液，分别吸取石斛酚标准溶液 200 μL 于 96 孔酶标板中，于 280 nm 波长处测定吸光度。以吸光度为纵坐标、石斛酚浓度为横坐标绘制标准曲线，得到石斛酚标准曲线的线性回归方程为 y=0.009 1x+0.060 8，R^2=0.999 6。

联苄类化合物提取率的计算：将多糖提取后的残渣按 1.3.3.1 和 1.3.3.2 试验条件提取联苄类化合物，4 000×g 离心 10 min，取上清液稀释，测定 280 nm 处吸光度，代入标准曲线线性回归方程计算联苄类化合物浓度，依据如下公式计算联苄类化合物提取率。

$$X = \frac{C \times E \times V}{1\,000 \times M} \times 100$$

式中：X 为联苄类化合物提取率，%；C 为联苄类化合物浓度，mg/mL；E 为稀释倍数；V 为提取液的体积，mL；M 为铁皮石斛质量，g；1 000 为换算系数。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 对单因素试验数据进行处理并作图，SPSS 27.0 软件对单因素进行显著性分析。运用 DPS V20.0 软件对均匀试验设计进行分析，Design-Expert 13.0 软件对 Box-Behnken 试验进行结果分析并作图。

2 结果与分析

2.1 铁皮石斛多糖提取工艺优化结果

2.1.1 单因素试验结果

2.1.1.1 酶种类对多糖提取率的影响

酶种类对多糖提取率的影响见图 1。

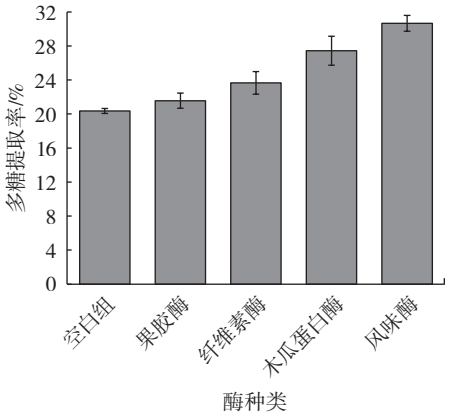


图 1 酶种类对多糖提取率的影响

Fig.1 Effect of enzyme types on extraction yield of polysaccharides

由图 1 可知，不同酶对铁皮石斛多糖提取率影响不同，其中，使用风味酶提取时，多糖提取率最高，达 30.66%。风味酶具有内切蛋白酶与外切肽酶两种酶活性，可以使与多糖结合牢固的蛋白有效分离，达到较好的脱蛋白效果，而多糖提取率则随着多糖的大量释放而升高。因此，后续试验选择风味酶用于酶解提取铁皮石斛多糖。

2.1.1.2 酶解时间对多糖提取率的影响

酶解时间对多糖提取率的影响见图 2。

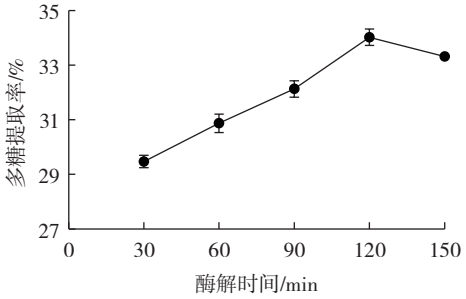


图 2 酶解时间对多糖提取率的影响

Fig.2 Effect of enzymatic hydrolysis time on extraction yield of polysaccharides

由图 2 可知，不同酶解时间对铁皮石斛多糖提取率影响不同，酶解时间为 30~120 min 时，多糖提取率持续升高。当酶解时间为 120 min 时，多糖提取率达到最高值，为 34.02%，此后再延长酶解时间，多糖提取率反而略有下降。这可能是因为酶解时间过短，酶解不充分；适当延长酶解时间，酶解反应趋于完成，多糖提取率达到峰值；继续延长酶解时间，酶解溶出的多糖不稳定，使提取率降低，且其它杂质会随着酶解时间的

延长而析出，导致后期纯化困难[16]。因此，选择酶解时间 90、120、150 min 作为均匀设计试验水平进行后续试验。

2.1.1.3 加酶量对多糖提取率的影响

加酶量对多糖提取率的影响见图 3。

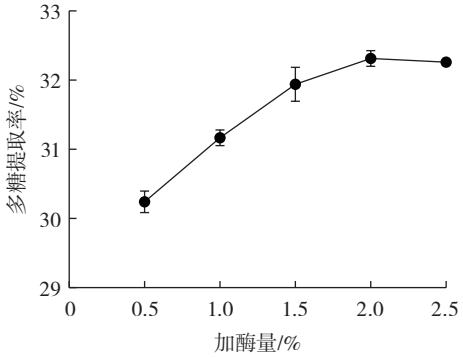


图 3 加酶量对多糖提取率的影响

Fig.3 Effect of amount of enzyme added on extraction yield of polysaccharides

由图 3 可知，不同的加酶量对铁皮石斛多糖提取率影响不同。当底物中添加 2.0% 酶时，多糖提取率高达 32.31%，说明适当增加酶用量可以有效提高多糖提取率，但在底物浓度不变的情况下，当加酶量达到饱和后，继续增加加酶量无法继续与底物反应，多糖提取率不再提高。因此，选择加酶量 1.5%、2.0%、2.5% 作为均匀设计试验水平进行后续试验。

2.1.1.4 料液比对多糖提取率的影响

料液比对多糖提取率的影响见图 4。

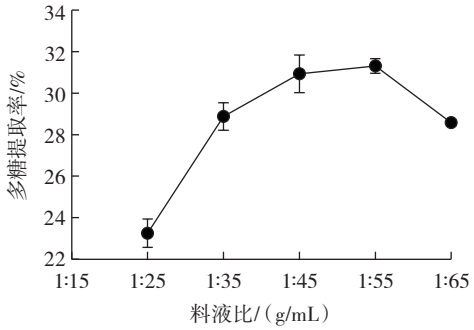


图 4 料液比对多糖提取率的影响

Fig.4 Effect of solid-liquid ratio on extraction yield of polysaccharides

由图 4 可知，不同料液比对铁皮石斛多糖提取率影响不同。溶剂用量的增加使多糖提取率先增大后下降，在料液比为 1∶55(g/mL)时，多糖提取率达到峰值(31.83%)，随后呈现下降的趋势。这可能是由于前期细胞内外浓度差大，多糖溶出迅速，但溶剂用量过大，则会导致铁皮石斛底物与酶的结合力不断下降，多糖提取率呈现下降趋势[17]。因此，选择料液比 1∶35、1∶45、1∶55(g/mL)作为均匀设计试验水平进行后续试验。

2.1.1.5 酶解温度对多糖提取率的影响

酶解温度对多糖提取率的影响见图 5。

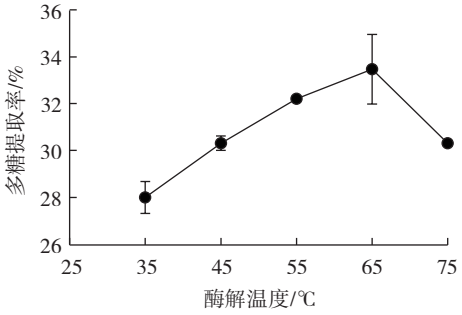


图 5 酶解温度对多糖提取率的影响

Fig.5 Effect of enzymatic hydrolysis temperature on extraction yield of polysaccharides

由图 5 可知，不同的酶解温度对铁皮石斛多糖提取率影响不同，多糖提取率随酶解温度升高先上升后下降，在酶解温度为 65 ℃时，多糖提取率达到峰值 33.46%。这可能是因为当酶解温度过低时，酶的活性不足，其催化作用受到限制；而当酶解温度过高时，酶的结构受到破坏，导致酶失活[18]。因此，选择酶解温度 55、65、75 ℃作为均匀设计试验水平进行后续试验。

2.1.2 均匀设计试验结果

2.1.2.1 均匀设计试验结果分析

在单因素试验结果基础上，以多糖提取率作为考察指标，通过 DPS 数据处理系统对均匀设计试验的数据进行分析，试验结果见表 3。

表 3 均匀设计试验结果

Table 3 Uniform design test results

序号	X_1 酶解温度/℃	X_2 酶解时间/min	X_3 料液比/(g/mL)	X_4 加酶量/%	多糖提取率/%
N1	65	120	1∶35	2.5	29.54
N2	75	150	1∶35	2.0	25.43
N3	75	150	1∶45	2.5	26.90
N4	65	90	1∶35	1.5	27.20
N5	75	120	1∶55	1.5	32.99
N6	65	150	1∶55	2.0	26.53
N7	75	90	1∶45	2.0	26.76
N8	55	150	1∶45	1.5	25.33
N9	55	90	1∶55	2.0	24.82
N10	55	120	1∶35	1.5	25.97
N11	65	120	1∶55	2.5	31.87
N12	55	90	1∶45	2.5	25.19

2.1.2.2 回归方程及方差分析

经拟合分析，得出铁皮石斛多糖提取率的回归方程为 $Y=-0.940+8.870X_1+19.837X_2-7.236X_3+8.430X_4-5.817X_2^2+1.925X_3^2-1.159X_4^2-0.664X_1X_3-2.948X_1X_4+1.647X_2X_4$。

回归方程方差分析结果见表 4。

表 4　回归方程方差分析

Table 4　Analysis of variances for regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
修正模型	76.706	8	9.588	12.730	0.030	*
X_1	22.479	2	11.240	14.923	0.028	*
X_2	8.786	2	4.393	5.833	0.093	
X_3	11.651	2	5.825	7.734	0.065	
X_4	4.668	2	2.334	3.099	0.186	
误差	2.260	3	0.753			
修正总计	78.965	11				

注：*表示影响显著（P<0.05）。

由表 4 可知，X_1、X_2、X_3、X_4 4 个因素对铁皮石斛多糖提取率影响程度依次为 X_1>X_3>X_2>X_4，即酶解温度>料液比>酶解时间>加酶量，其中酶解温度（P=0.028<0.05）对铁皮石斛的多糖提取率有显著影响。修正模型的 P=0.030<0.05，说明模型具有统计学意义，R^2=0.971 0，表明模型搭建合理，有良好的拟合性，在参数优化方面可以较好地对铁皮石斛多糖提取率进行预测。

2.1.2.3　最佳提取工艺的预测及验证

通过均匀设计优化铁皮石斛多糖的提取工艺条件为酶解温度 65.43 ℃、酶解时间 119.61 min、料液比为 1∶44.52（g/mL）、加酶量 1.54%，由模型得到的多糖提取率预测值为 35.75%。考虑到实际应用，将最佳工艺条件调整为酶解温度 65 ℃、酶解时间 120 min、料液比 1∶45（g/mL）、加酶量 1.5%。根据修改后的工艺进行 3 次试验验证，得到铁皮石斛多糖提取率的平均值为 33.69%，实际值与预测值相近，误差较小，证明混合均匀设计试验结果可靠，说明优化后的提取工艺可行且有效。

2.2　铁皮石斛联苄类化合物提取工艺优化结果

2.2.1　单因素试验结果

2.2.1.1　超声时间对联苄类化合物提取率的影响

超声时间对联苄类化合物提取率的影响见图 6。

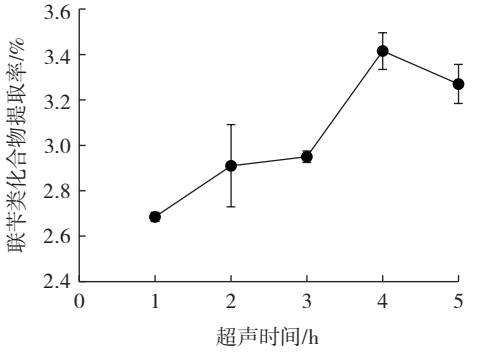


图 6　超声时间对联苄类化合物提取率的影响

Fig.6　Effect of ultrasonic time on extraction yield of benzyl compounds

由图 6 可知，不同的超声时间对铁皮石斛联苄类化合物提取率影响不同，当超声时间为 4 h 时，联苄类化合物的提取率达到最高，为 3.42%。这是因为超声波具有空化效应，加速细胞壁的破裂，从而促使细胞内联苄类化合物向溶剂中溶出[19]。但随着超声时间延长，超声作用产生的剪切力不断增加，长时间振动可能破坏了部分联苄类化合物的结构，且超声时间过长可能导致其他物质也同步溶出，进而降低植物细胞内外的传质效率，导致提取率下降。因此，选择超声时间 3、4、5 h 作为响应面设计试验水平。

2.2.1.2　料液比对联苄类化合物提取率的影响

料液比对联苄类化合物提取率的影响见图 7。

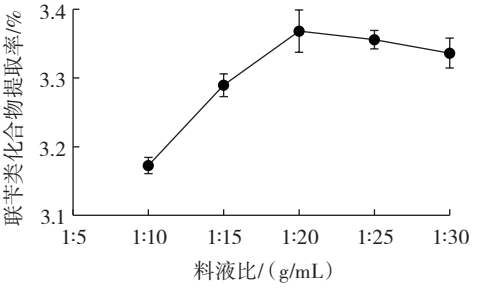


图 7　料液比对联苄类化合物提取率的影响

Fig.7　Effect of solid-liquid ratio on extraction yield of benzyl compounds

由图 7 可知，不同的料液比对铁皮石斛联苄类化合物提取率影响不同，联苄类化合物的提取率随着溶剂的不断加入呈现先增加后降低的趋势，当料液比为 1∶20（g/mL）时，联苄类化合物提取率达到峰值（3.37%）。这是因为溶剂量较低时，铁皮石斛联苄类化合物细胞内外浓度差小，而随着溶剂用量的增加，细胞内外浓度差加大，提取率提高，但当料液比达到 1∶20（g/mL）后，联苄类化合物的溶出量达到饱和状态，所以继续增加溶剂用量也无法提高联苄类化合物提取率[20]。因此，后续选择料液比 1∶15、1∶20、1∶25（g/mL）作为响应面设计试验水平。

2.2.1.3　乙醇体积分数对联苄类化合物提取率的影响

乙醇体积分数对联苄类化合物提取率的影响见图 8。

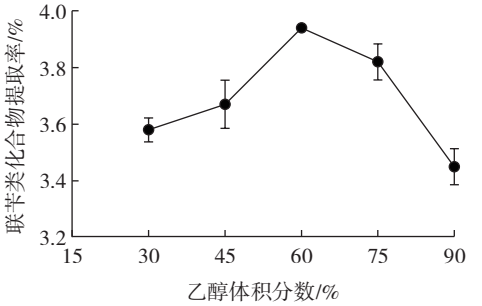


图 8　乙醇体积分数对联苄类化合物提取率的影响

Fig.8　Effect of ethanol volume fraction on extraction yield of benzyl compounds

由图 8 可知，不同的乙醇体积分数对铁皮石斛联苄类化合物提取率影响不同，乙醇体积分数为 60%

时，联苄类化合物提取率达到峰值（3.94%）。联苄类化合物通过化学键与多糖、蛋白质在植物的细胞壁中结合，在高体积分数乙醇溶液中，蛋白质易发生变性，导致与之结合的联苄类化合物难以溶出，从而降低其提取率；且醇溶性物质会随着乙醇体积分数的增加而溶出，与联苄类化合物竞争结合乙醇，致使联苄类化合物提取率降低[21]。因此，后续选择乙醇体积分数 45%、60%、75% 作为响应面设计试验水平。

2.2.2　响应面设计试验结果

2.2.2.1　响应面设计试验结果分析

在单因素试验基础上，选取超声时间、料液比、乙醇体积分数为因素，以铁皮石斛联苄类化合物提取率为响应值，进行三因素三水平的 Box-Behnken 响应面设计试验，试验结果见表 5。

表 5　响应面设计试验结果

Table 5　Response surface test results

序号	A 超声时间/h	B 料液比/（g/mL）	C 乙醇体积分数/%	联苄类化合物提取率/%
1	3	1∶15	60	3.26
2	5	1∶15	60	3.12
3	3	1∶25	60	3.27
4	5	1∶25	60	3.35
5	3	1∶20	45	2.58
6	5	1∶20	45	2.57
7	3	1∶20	75	3.57
8	5	1∶20	75	3.55
9	4	1∶15	45	2.53
10	4	1∶25	45	1.97
11	4	1∶15	75	3.28
12	4	1∶25	75	3.46
13	4	1∶20	60	3.60
14	4	1∶20	60	3.69
15	4	1∶20	60	3.67
16	4	1∶20	60	3.35
17	4	1∶20	60	3.31

2.2.2.2　回归方程及方差分析

以铁皮石斛联苄类化合物提取率作为评价指标（Y），运用 Design-Expert 13.0 软件分析响应面设计试验结果，得出铁皮石斛联苄类化合物提取率的回归模拟方程为 $Y=3.52-0.012A-0.018B+0.526C+0.055AB-0.003AC+0.185BC-0.008A^2-0.266B^2-0.448C^2$。方差分析结果见表 6。

由表 6 可知，C、C^2 影响极显著，对回归方程的影响较大（$P<0.01$），B^2 对联苄类化合物提取率的影响显著（$P<0.05$），其余因素影响不显著。各因素对联苄类化合物提取率的影响次序为乙醇体积分数（C）>料液比（B）>超声时间（A）。模型极显著（$P=0.001<0.01$），表明数据合理，结果具有较高的可信度；决定系数 $R^2=0.950\,1$，表明模型具有较强的解释能力；失拟项 $P=0.656\,4>0.05$，说明方程拟合效果好[22]，模型选择合适，该模型可以较好地对铁皮石斛联苄类化合物提取率进行预测。

表 6　回归方程方差分析

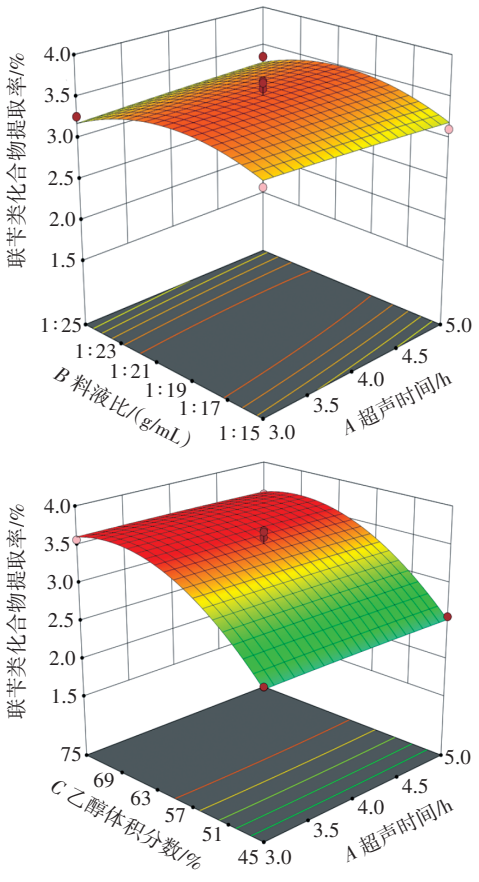
Table 6　Analysis of variances for regression equation

来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3.580	9	0.398	14.80	0.001	**
A	0.001	1	0.001	0.038	0.852	
B	0.003	1	0.003	0.091	0.771	
C	2.220	1	2.220	82.490	<0.001	**
AB	0.012	1	0.012	0.451	0.524	
AC	0.000	1	0.000	0.001	0.977	
BC	0.137	1	0.137	5.100	0.059	
A^2	0.000	1	0.000	0.011	0.921	
B^2	0.297	1	0.297	11.070	0.013	*
C^2	0.846	1	0.846	31.500	0.001	**
残差	0.188	7	0.027			
失拟项	0.057	3	0.019	0.584	0.656 4	
纯误差	0.131	4	0.033			
总和	3.770	16				

注：**表示影响极显著（$P<0.01$）；*表示影响显著（$P<0.05$）。

2.2.2.3　响应面交互作用分析

曲面的倾斜程度反映了试验值随试验条件变化的动态趋势，当因素之间的交互作用明显时，响应曲面的变化趋势就会很大。各因素交互作用对联苄类化合物提取率影响的响应曲面见图 9。



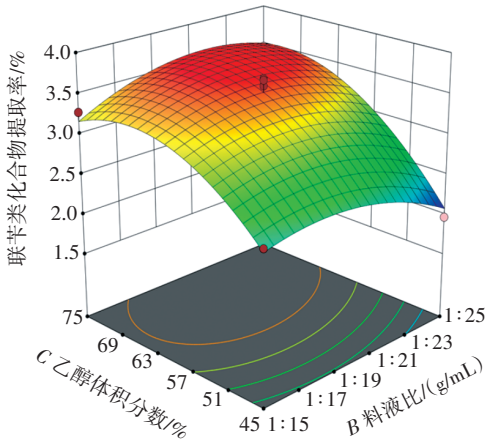


图 9　各因素交互作用对联苄类化合物提取率影响的响应曲面

Fig.9　The response surfaces of interaction of factors on extraction yield of benzyl compounds

从图 9 中可以看出，料液比和乙醇体积分数两个因素之间的交互作用最为明显，乙醇体积分数和超声时间交互作用最不明显，与方差分析结果基本一致。

2.2.2.4　最佳提取工艺的预测及验证

通过 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行优化，得到提取铁皮石斛中联苄类化合物的最优条件为料液比 1∶19.23（g/mL）、乙醇体积分数 69.57%、超声时间 4.48 h，由模型得到的预测值为 3.68%，考虑到实际应用，将最佳工艺条件调整为料液比 1∶20（g/mL）、乙醇体积分数 70%、超声时间 4 h，并进行 3 次验证试验，得到铁皮石斛联苄类化合物提取率的平均值为 3.71%，实际值与预测值相近，误差较小，说明利用 Box-Behnken 响应面法优化铁皮石斛联苄类化合物的提取工艺参数可行且有效。

3　结论

本研究聚焦铁皮石斛多糖与联苄类化合物的协同高效提取，实现“一物多提、梯级利用”。采用单因素结合均匀设计法优化铁皮石斛多糖提取工艺，结果表明，多糖提取的最佳工艺条件为酶解温度 65 ℃、酶解时间 120 min、料液比 1∶45（g/mL）、加酶量 1.5%，此条件下铁皮石斛多糖提取率为 33.69%；联苄类化合物提取的最佳工艺条件为超声时间 4 h、料液比 1∶20（g/mL）、乙醇体积分数 70%，此条件下铁皮石斛联苄类化合物提取率的平均值为 3.71%。预测值与试验实际值的提取率均相近，说明试验结果可靠，优化的提取工艺可行有效。

参考文献：

[1] 国家药典委员会 . 中华人民共和国药典—2020 年版[M]. 北京：中国医药科技出版社, 2023.
Chinese Pharmacopoeia Commission. People′s Republic of China (PRC) pharmacopoeia-2020 edition[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2023.

[2] 郭晓萍, 张海波, 张志强, 等 . 铁皮石斛多糖抗肿瘤作用研究进展[J]. 肿瘤预防与治疗, 2024, 37(9): 800-808.
GUO Xiaoping, ZHANG Haibo, ZHANG Zhiqiang, et al. Research progress on anti-tumor effect of *Dendrobium officinale* polysaccharide[J]. Journal of Cancer Control and Treatment, 2024, 37(9): 800-808.

[3] 李杰, 章金辉, 叶庆生, 等 . 大苞鞘石斛和铁皮石斛多糖提取及其免疫调节作用比较[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 89-95.
LI Jie, ZHANG Jinhui, YE Qingsheng, et al. Extracting and immune activity comparison of polysaccharides from *Dendrobium wardianum* and *Dendrobium officinale*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 89-95.

[4] LI M X, YUE H, WANG Y Q, et al. Intestinal microbes derived butyrate is related to the immunomodulatory activities of *Dendrobium officinale* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 717-723.

[5] LI J, YANG X L, ZHENG Z Y, et al. Immune regulation mechanism of polysaccharide from *Dendrobium officinale* Kimura et Migo on intestinal *Lamina propria* cells[J]. Food Bioscience, 2025, 71: 107410.

[6] WU J, HE T, WANG Z Z, et al. The dynamic analysis of non-targeted metabolomics and antioxidant activity of *Dendrobium officinale* Kimura et Migo by the synergistic fermentation of bacteria and enzymes[J]. LWT - Food Science and Technology, 2024, 203: 116354.

[7] ZHOU H P, DONG Y J, WU Z Y, et al. Ultrasound-assisted enzyme extraction of *Dendrobium officinale* polysaccharides: Extraction process, characterization, immunomodulatory effects[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 114: 107248.

[8] HE Y, LI L, CHANG H, et al. Research progress on extraction, purification, structure and biological activity of *Dendrobium officinale* polysaccharides[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 965073.

[9] 张石玉, 龚小见, 周欣, 等 . 铁皮石斛的化学成分及药理作用研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(4): 257-278.
ZHANG Shiyu, GONG Xiaojian, ZHOU Xin, et al. Advance on chemical components and pharmacological effects of *Dendrobium officinale*[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(4): 257-278.

[10] ZHANG T T, ZHU M M, MA J L, et al. Moscatilin inhibits vascular calcification by activating IL13RA2 - dependent inhibition of STAT3 and attenuating the WNT3/β-catenin signalling pathway[J]. Journal of Advanced Research, 2025, 68: 445-457.

[11] 姚萌, 魏玉颖, 邓晓东, 等 . 石斛有效成分毛兰素抗肿瘤效应及机制研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2025, 61(5): 103-108.
YAO Meng, WEI Yuying, DENG Xiaodong, et al. Research progress on the anti-tumor effect and mechanism of activity component erianin in *Dendrobium*[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2025, 61(5): 103-108.

[12] 李京朔, 刘首诗, 郭宏伟 . 毛兰素诱导乳腺癌细胞凋亡的机制及治疗潜力的研究进展[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(14): 2132-2137.
LI Jingshuo, LIU Shoushi, GUO Hongwei. Advances in the mechanism and therapeutic potential of erianin - induced apoptosis in breast cancer cells[J]. The Journal of Practical Medicine, 2025, 41(14): 2132-2137.

[13] 李学玲, 白芩凡, 孙体杰, 等 . 铁皮石斛多糖的结构表征与抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 32-39.
LI Xueling, BAI Qinfan, SUN Tijie, et al. Structural characterization and antioxidant activity of *Dendrobium officinale* polysaccha-

rides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 32-39.

[14] 徐源, 谷清义, 闫婷婷, 等 . 香茅草多糖提取工艺的优化及抗氧化活性分析[J]. 饲料研究, 2025, 48(3): 120-125.
XU Yuan, GU Qingyi, YAN Tingting, et al. Study on optimization of extraction process and antioxidant activity analysis of lemongrass polysaccharides[J]. Feed Research, 2025, 48(3): 120-125.

[15] 戚思杰 . 天然联苄衍生物的设计、制备及生物活性研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
QI Sijie. Design, synthesis and biological evaluation of natural bibenzyl derivatives[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

[16] 于纯淼, 廖贤, 陈小倩, 等 . 复合酶法提取诺丽多糖的工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 142-151.
YU Chunmiao, LIAO Xian, CHEN Xiaoqian, et al. Process optimization of complex enzyme extraction of noni polysaccharides and its antioxidant activity *in vitro*[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 142-151.

[17] 廖霞, 王莹, 黄大川, 等 . 微波辅助酶法提取铁皮石斛多糖的工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 43-48.
LIAO Xia, WANG Ying, HUANG Dachuan, et al. Microwave assisted enzymatic extraction of polysaccharide from *Dendrobium candidum*[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(1): 43-48.

[18] 张小琴, 吴中宝, 杜小琴, 等 . 半仿生-酶法优化铁皮石斛多糖的提取工艺及其抗氧化性研究[J]. 化学研究与应用, 2022, 34(10): 2558-2564.
ZHANG Xiaoqin, WU Zhongbao, DU Xiaoqin, et al. Optimization of extraction process and antioxidant of polysaccharides from *Dendrobium officinale* by semi bionic enzymatic methodology[J]. Chemical Research and Application, 2022, 34(10): 2558-2564.

[19] 张天华, 胡心蕊, 张泽淳, 等 . 超声辅助酶法提取巴戟天多糖的工艺优化及抗氧化研究[J]. 食品工业, 2025, 46(1): 37-41.
ZHANG Tianhua, HU Xinrui, ZHANG Zechun, et al. Optimization extraction process by ultrasonic-assisted enzymolysis and antioxidation of polysaccharides from *Morinda officinalis*[J]. The Food Industry, 2025, 46(1): 37-41.

[20] 朱伊柯, 刘忠 . 天然芪类化合物的制备、鉴定及生物活性研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(15): 14-16.
ZHU Yike, LIU Zhong. Research progress on preparation, identification and bioactivity of natural stilbenes[J]. Modern Chemical Research, 2023(15): 14-16.

[21] 徐艳飞, 夏谦, 李康银, 等 . 铁皮石斛中石斛多糖、石斛碱、石斛酚的联合提取[J]. 云南化工, 2022, 49(6): 30-32.
XU Yanfei, XIA Qian, LI Kangyin, et al. Combined extraction of polysaccharide, alkaloids and gigantol from *Dendrobium officinale*[J]. Yunnan Chemical Technology, 2022, 49(6): 30-32.

[22] 张瑞华, 付立斌, 羊银, 等 . 响应面法优化辣木叶多酚微波辅助提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(13): 144-149.
ZHANG Ruihua, FU Libin, YANG Yin, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from *Moringa oleifera* leaves using response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2024, 45(13): 144-149.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2026-01-27

(上接第77页)

LIAO Renzhao, WANG Fengying, LI Liufeng, et al. Low temperature preservation test on different variaties of litchi[J]. Southern Horticulture, 2018, 29(6): 59-61.

[35] 薛晓清 . 不同胁迫处理荔枝果皮褐变差异及机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
XUE Xiaoqing. Differences among litchi pericarp browning caused by different stress treatments and its mechanisms[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.

[36] 孙进华, 曹璐璐, 李焕苓, 等 . 霜疫霉侵染后荔枝果皮结构变化的扫描电镜观察[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 947-952.
SUN Jinhua, CAO Lulu, LI Huanling, et al. Scanning electron microscope observation on the changes of litchi exocarp inoculated with *Phytophthora litchii*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(5): 947-952.

[37] 许超群, 陈飞平, 梁旭茹, 等 . 肉桂醛与 ε-聚赖氨酸盐酸盐的抑菌活性及其协同抑菌机制初探[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 24-31.
XU Chaoqun, CHEN Feiping, LIANG Xuru, et al. Preliminary investigation of the antimicrobial activities and synergies of cinnamaldehyde and ε-polylysine hydrochloride[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 24-31.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2025-08-21