

黑参多糖复合酶提取工艺优化

刘 昕¹ 徐多多¹ 邱潮楠² 樊 博¹ 侯相竹¹ 张会佳² 高 阳²

(1. 长春中医药大学药学院, 吉林 长春 130117; 2. 长春中医药大学人参科学研究院, 吉林 长春 130117)

摘要: [目的] 采用酶提取法优化黑参多糖(BGP)提取工艺, 并考察其抗氧化活性。[方法] 采用正交工艺法优化复合酶提取 BGP 的最佳用量, 采用响应面法优化复合酶提取 BGP 工艺条件, 并利用 DPPH 自由基法、ABTS⁺ 自由基法评价黑参多糖的体外抗氧化活性。[结果] 最佳复合酶配比为 120 mg 纤维素酶、120 mg 果胶酶、80 mg 木瓜蛋白酶; 最佳酶解工艺条件为酶解料液比 1:50 (mg/mL), pH 7.5, 提取时间 2.5 h, 提取温度 45 °C, 此时 BGP 得率最高可达 (20.04±0.14)%; 当黑参多糖质量浓度为 3 mg/mL 时, 对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基的清除率分别为 54.38% 和 92.14%。[结论] 复合酶提取 BGP 得率高, 工艺稳定可行, 且该 BGP 具有一定的抗氧化活性。

关键词: 黑参多糖; 复合酶; 提取工艺; 响应面; 抗氧化

Extraction process optimization of black ginseng polysaccharides by compound enzymes

LIU Xin¹ XU Duoduo¹ QIU Chaonan² FAN Bo¹ HOU Xiangzhu¹
ZHANG Huijia² GAO Yang²

(1. School of Pharmaceutical Sciences, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun, Jilin 130117, China;

2. Ginseng Academy of Sciences, Changchun University of Traditional Chinese Medicine, Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract: [Objective] To optimize the extraction process of black ginseng polysaccharides (BGP) by an enzyme extraction method, and to investigate the antioxidant activity of BGP. [Methods] The optimal dosage of compound enzymes for BGP extraction is obtained using the orthogonal method, and the process conditions for BGP extraction by compound enzymes are optimized using the response surface method. The *in vitro* antioxidant activity of BGP is evaluated using the DPPH and the ABTS⁺ radical methods. [Results] The optimal enzyme ratio is 120 mg cellulase, 120 mg pectinase, and 80 mg papain. The optimal enzymatic hydrolysis process conditions are an enzymatic digestion liquid ratio of 1:50 (mg/mL), pH of 7.5, extraction time of 2.5 hours, and extraction temperature of 45 °C, at which the BGP yield can reach up to (20.04±0.14)%. When the BGP concentration is 3 mg/mL, the DPPH radical and ABTS⁺ radical scavenging rates are 54.38% and 92.14%, respectively. [Conclusion] BGP yield by the compound enzyme extraction process is high. The process is stable and feasible, and the resulting BGP exhibits certain antioxidant activity.

Keywords: black ginseng polysaccharide; complex enzyme; extraction process; response surface; antioxidant

黑参(black ginseng)是将五加科人参(*Panax ginseng* C. A. Mey.)通过多次蒸制和干燥,即“九蒸九曝”得到的人参深加工产品^[1],因其外观为深黑色而得名。经过这一加工过程,黑参的化学成分和生物活性均发生了显著变化^[2]。白参和黑参中均含有人参皂苷、挥发油、有机酸、多

糖、氨基酸等化学成分^[3-4],但其主要活性成分人参皂苷的种类有显著变化,黑参中稀有皂苷的含量也明显提高,这与其具有更强的抗肿瘤、抗氧化活性密切相关^[5-8];此外,与白参和红参相比,黑参多糖(BGP)含量更高,且其对 DPPH 自由基的清除能力也更强^[9]。近年来,以黑参为

基金项目:吉林省科技发展计划项目(编号:20210401058YY, YDZJ202401032ZYTS)

通信作者:徐多多(1979—),女,长春中医药大学副教授,硕士生导师,博士后。E-mail: czxuduoduo@163.com

收稿日期:2024-10-02 改回日期:2025-06-12

引用格式:刘昕,徐多多,邱潮楠,等.黑参多糖复合酶提取工艺优化[J].食品与机械,2026,42(1):153-160.

Citation:LIU Xin, XU Duoduo, QIU Chaonan, et al. Extraction process optimization of black ginseng polysaccharides by compound enzymes[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 153-160.

原料已开发出一系列的健康产品及化妆品^[10],具有广阔的应用潜力^[11]。

人参多糖因活性显著、毒性低的特点,已成为广大学者研究的热点,而对黑参的研究更多集中在皂苷类成分,对黑参多糖的深入研究相对较少,而黑参多糖往往在抗肿瘤、提高免疫力等方面具有较好的活性,是黑参研究未来方向之一。目前,多糖提取主要采用复合酶法、水浸提法、酸碱浸提法等工艺^[12]。其中,酶解法具有条件温和、效率高、特异性强、操作简便等优点,与传统水煎煮法相比,酶解法反应条件温和,所用有机溶剂少,步骤简易,已被广泛用于各种中草药多糖的提取^[13-14]。研究拟以复合酶法提取黑参多糖,采用响应面法优化其工艺条件,以期在黑参多糖的制备工艺及药效学研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

黑参药材:经长春中医药大学高其品教授鉴定为五加科植物的干燥根和根茎,市售;

纤维素酶(50 U/mg)、果胶酶(500 U/mg)、木瓜蛋白酶(800 U/mg)、DPPH(纯度 96%)、ABTS(纯度 98%):上海源叶生物科技有限公司;

葡萄糖:纯度≥99.5%,美国 Sigma 公司;

酶标仪:M200pro 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

离心机:Anke TDL-5-A 型,上海安亭科学仪器厂;

分析天平:X5-204 型,梅特勒—托利多仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 黑参多糖含量测定 取适量葡萄糖标准品,加水配制成质量浓度为 0.1 mg/mL 的标准品溶液,取 1 mL 溶液,采用苯酚—硫酸法^[15]进行显色测定,以葡萄糖质量浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标,绘制葡萄糖标准曲线方程为 $y=15.23x+0.0907$, $R^2=0.9997$ 。取适量 BGP,加水配制成供试品溶液,根据回归方程计算 BGP 含量。

1.2.2 复合酶提取 BGP 工艺 参照殷澳等^[16]的方法并稍作修改,提取流程如图 1 所示,并按式(1)计算黑参多糖得率。

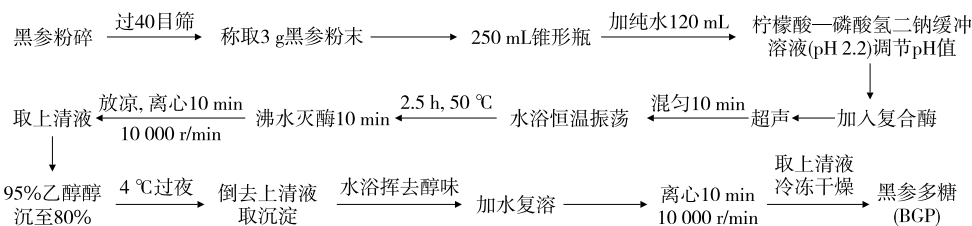


图 1 复合酶提取黑参多糖酶工艺流程

Figure 1 BGP extraction process by compound enzymes

$$Z = \frac{C \times V \times F}{M} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Z——黑参多糖得率,%;

C——黑参提取液中多糖的质量浓度,mg/mL;

V——提取液的体积,mL;

F——稀释倍数;

M——黑参粉末质量,g。

1.2.3 酶用量单因素试验 固定料液比 1:40 (g/mL)、pH 6.0、提取温度 50 °C、提取时间 2.5 h。分别考察纤维素酶用量(60, 80, 100, 120, 140, 160 mg)、果胶酶用量(40, 60, 80, 100, 120, 140 mg)和木瓜蛋白酶用量(80, 100, 120, 140, 160, 180 mg)对 BGP 含量的影响。

1.2.4 复合酶正交试验 采用 $L_9(3^4)$ 正交试验,以纤维素酶用量、果胶酶用量、木瓜蛋白酶用量为因子,以 BGP 得率为指标,对复合酶的最佳配比进行优化。

1.2.5 复合酶与单酶对比 纤维素酶(黑参 9.6 g,纤维素酶 320 mg)、果胶酶(黑参 8 g,果胶酶 320 mg)、木瓜蛋白

酶(9.6 g 黑参,木瓜蛋白酶 320 mg)和复合酶(黑参 9 g,纤维素酶 120 mg、果胶酶 120 mg、木瓜蛋白酶 80 mg),按照 1.2.2 的方法分别进行酶提取并计算得率,对比单一酶与复合酶法的提取效果。

1.2.6 复合酶法单因素试验 加入复合酶(120 mg 纤维素酶、120 mg 果胶酶、80 mg 木瓜蛋白酶),分别以料液比 [1:30, 1:35, 1:40, 1:45, 1:50 (g/mL)]、酶解 pH 值(5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0)、酶解温度(40, 45, 50, 55, 60 °C)、酶解时间(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 h)为单因素,考察其中一种因素时固定其余工艺条件不变,以 BGP 得率为指标进行单因素试验。

1.2.7 响应面试验 采用 Design-Expert 13 软件对复合酶法提取工艺进行响应面分析与优化。

1.2.8 抗氧化活性分析

(1) DPPH 自由基清除活性测定:参考黄明浩等^[17]的方法稍作修改,配制 0.1 mmol/L 的 DPPH 乙醇工作液。吸取 100 μ L 不同浓度的维生素 C 标准溶液以及黑参多糖溶液于 96 孔板中,各孔分别加入 100 μ L DPPH 工作液,避光

0.5 h,测定 517 nm 处吸光度值。按式(2)计算 DPPH 自由基清除率。

$$T = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

T ——自由基清除率,%;

A_1 ——样品组吸光度;

A_2 ——样品背景吸光度;

A_0 ——控制组吸光度。

(2) ABTS⁺自由基清除活性测定:参考吕庆银等^[18]的方法并修改。将 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液与 7 mmol/L ABTS⁺溶液按体积比 1:1 混合,避光放置 12~16 h,在紫外 734 nm 下通过甲醇稀释,使溶液吸光度达到 0.700±0.020,即得 ABTS 工作液。吸取 100 μL 不同浓度的维生素 C 标准溶液以及黑参多糖溶液于 96 孔板,各孔加入

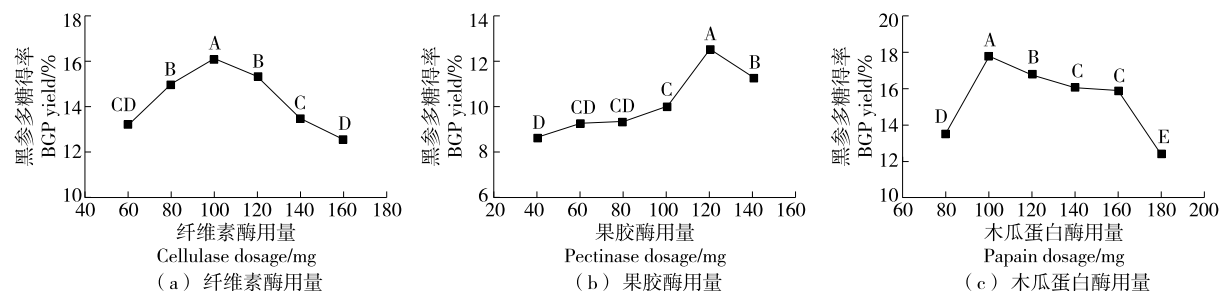
100 μL ABTS 工作液,避光静置 0.5 h,测定 734 nm 处吸光度值。按式(2)计算 ABTS⁺自由基清除率。

1.2.9 数据处理 采用 Origin 2021 软件绘图,选择 Stats 和 Design-Expert 13 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 复合酶用量配比优化

2.1.1 单因素试验 由图 2 可知,随着酶用量的增加,BGP 得率逐渐升高,达到最高点后开始缓慢下降,当纤维素酶为 100 mg、果胶酶为 120 mg、木瓜蛋白酶为 100 mg 时,BGP 得率达到最高,分别为(16.09±0.32)%、(12.46±0.23)%、(17.73±0.28)%。得率呈上升趋势是由于酶用量不足,还不能完全降解细胞使多糖溶出,当达到最佳酶添加量后得率开始下降,可能是由于加入的酶过量,酶分子达到了饱和状态,部分酶分子无法与底物结合,导致底物水解速度降低^[19-20]。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图2 单酶用量单因素试验结果

Figure 2 Single factor experiment results of single enzyme dosage

2.1.2 复合酶用量正交试验 在单因素试验基础上,选取纤维素酶用量、果胶酶用量和木瓜蛋白酶用量为因素,进行三因素三水平正交试验。试验因素见表1,试验设计及结果见表2。

由表2和表3可知,酶种类及用量对BGP得率影响显著($P < 0.05$);根据 R 值可以看出,木瓜蛋白酶对BGP得率影响最为明显,纤维素酶次之;最佳的复合酶选择方案为 $A_3B_2C_1$,即纤维素酶120 mg、果胶酶120 mg、木瓜蛋白酶80 mg,此时BGP得率为19.87%。

2.2 复合酶提取与单酶对比

由图3可知,采用复合酶提取时BGP得率最高,为(18.65±0.39)%,均显著大于纤维素酶、果胶酶、木瓜蛋白酶单酶提取的,所以选用复合酶进行后续试验。

2.3 复合酶法提取黑参多糖工艺优化

2.3.1 单因素试验 由图4(a)可知,随着料液比的增加,BGP得率先增加后减小,最优料液比为1:50(g/mL);随着溶剂用量的增加,多糖浓度差异变大,增大了多糖

表1 复合酶法提取黑参多糖的正交试验

Table 1 Orthogonal experiment of BGP extraction by compound enzyme method

水平	A 纤维素酶 用量/mg	B 果胶酶 用量/mg	C 木瓜蛋白酶 用量/mg
1	80	100	80
2	100	120	100
3	120	140	120

的溶出,继续增大溶剂体积会导致其他水溶性成分溶出,从而降低多糖得率。由图4(b)可知,pH为7.0时BGP得率最高,酸碱环境下酶活性下降,多糖降解加快,因此多糖得率降低,但随着pH的继续升高,复合酶活性逐渐降低,多糖提取率呈降低趋势^[21]。由图4(c)可知,当提取时间<2 h时,酶与底物未充分反应,BGP未完全溶出,随着提取时间的延长,多糖溶出量增加;当提取时间>2 h时,过度提取会导致活性成分分解,多糖得率降低。由图4(d)可知,当提取温度<45℃时,

表 2 酶配比正交试验

Table 2 Orthogonal experiment of enzyme ratio				
试验号	A	B	C	BGP 得率/%
1	1	1	1	15.96
2	1	2	2	10.56
3	1	3	3	6.96
4	2	1	2	7.92
5	2	2	3	11.40
6	2	3	1	9.84
7	3	1	3	16.68
8	3	2	1	19.87
9	3	3	2	8.91
<hr/>				
k_1	11.16	13.52	15.22	
k_2	9.72	13.94	9.13	
k_3	15.15	8.57	11.68	
R	5.43	5.37	6.09	

分子运动弱,复合酶活性不能很好地发挥,且很难释放出有效成分,随着提取温度的升高,细胞壁中的 BGP 也释放出来,但提取温度过高,酶活性降低,因此多糖得率下降。当提取温度为 55~65 ℃时,多糖得率趋于平稳状态。

表 3 正交试验结果方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance of orthogonal experiment results					
来源	III 型平方和	自由度	均方	F	Sig.
模型	157.282	6	26.214	56.203	0.018
截距	1 298.401	1	1 298.401	2 783.813	0.000
A	47.541	2	23.771	50.965	0.019
B	53.554	2	26.777	57.411	0.017
C	56.186	2	28.093	60.233	0.016
误差	0.933	2	0.466		
总计	1 456.616	9			
校正的总计	158.215	8			

[†] $R^2 = 0.994, R^2_{Adj} = 0.976$ 。

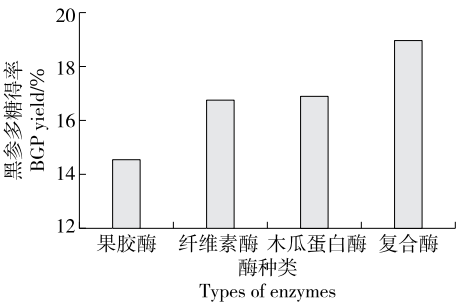
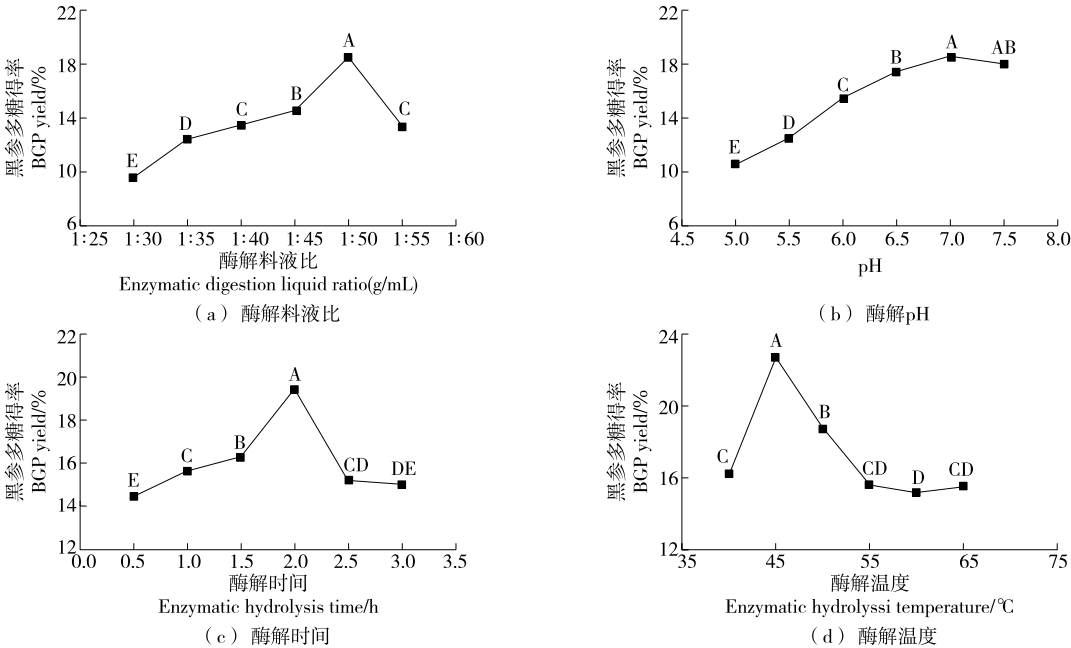


图 3 复合酶与 3 种单酶提取黑参多糖得率对比
Figure 3 Comparison of the BGP yield by compound enzymes and three single enzymes



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)
图 4 复合酶提取工艺对黑参多糖得率的影响

Figure 4 Effect of extraction process optimization by compound enzymes on the BGP yield

2.3.2 Box-Behnken 试验 在单因素试验基础上,以料液比、pH、酶解温度和酶解时间为因素,以BGP得率为响应值,进行四因素三水平响应面优化试验。试验因素水平见表4,试验设计及结果见表5,回归模型方差分析见表6。

根据模型,得多项回归方程为:

$$Y=18.45-0.210\ 8A+0.715B+0.492\ 5C+1.19D+0.652\ 5AB-0.21AC+0.24AD+1.63BC+2.00BD-2.26CD-2.38A^2-0.682B^2-4.60C^2-0.177D^2。 \quad (3)$$

根据表6可知,模型 $F=9.71$, $P<0.000\ 1$,具有极显著差异,说明模型拟合良好。失拟项不显著($P=0.061\ 1>0.05$),说明试验结果受到的干扰较小,可用于试验结果的分析。预测 $R^2=0.489\ 5$,与调整 R^2 之差为 $0.323\ 7$,二者较为接近,回归方程的拟合程度和可信度较高,可利用该模型分析。比较 F 值大小,得出各因素对BGP得率的影响大小顺序为料液比>酶解温度>pH>酶解时间。一次项 D ,二次项 A^2 、 C^2 影响极显著($P<0.01$),交互项 BC 、 BD 和 CD 影响显著^[22]。

2.3.3 等高线图和响应面图 曲面坡度越陡、等高线越密集、椭圆程度越大,两者之间的交互作用越明显^[23]。由图5可知,料液比对BGP得率的影响大于pH;料液比对BGP得率的影响大于酶解温度,曲面坡度陡,料液比和酶解温度对BGP得率影响较大;酶解时间对BGP得率的影响大于料液比;pH对BGP得率的影响大于酶解温度;酶

表4 Box-Behnken试验因素水平表

Table 4 Factors and levels of Box-Behnken experiment

水平	A 料液比 (g/mL)	B pH	C 酶解温 度/℃	D 酶解时 间/h
1	1:45	6.5	40	1.5
2	1:50	7.0	45	2.0
3	1:55	7.5	50	2.5

解时间对BGP得率的影响大于pH;酶解时间对BGP得率的影响大于酶解温度。

2.3.4 最佳工艺条件验证 在响应面模型预测中,复合酶法提取BGP的最佳工艺条件为料液比1:50(g/mL),pH 7.5,酶解温度45℃,酶解时间2.5 h,此时BGP得率为21.547%。按最佳工艺条件进行3次平行验证实验,测定BGP得率为 $(20.04\pm 0.14)\%$,与预测值无显著性差异,说明响应面法优化的最佳工艺稳定可行。

2.4 抗氧化活性分析

2.4.1 DPPH 自由基清除活性 由图6(a)可知,在0~4 mg/mL质量浓度范围内,BGP对DPPH自由基的清除效率与BGP质量浓度存在明显正相关,当质量浓度为0.005~4.000 mg/mL时,DPPH自由基清除率达到18.52%~52.61%,说明BGP对DPPH自由基具有一定的清除作用。

2.4.2 ABTS⁺自由基清除活性 由图6(b)可知,在0.005~

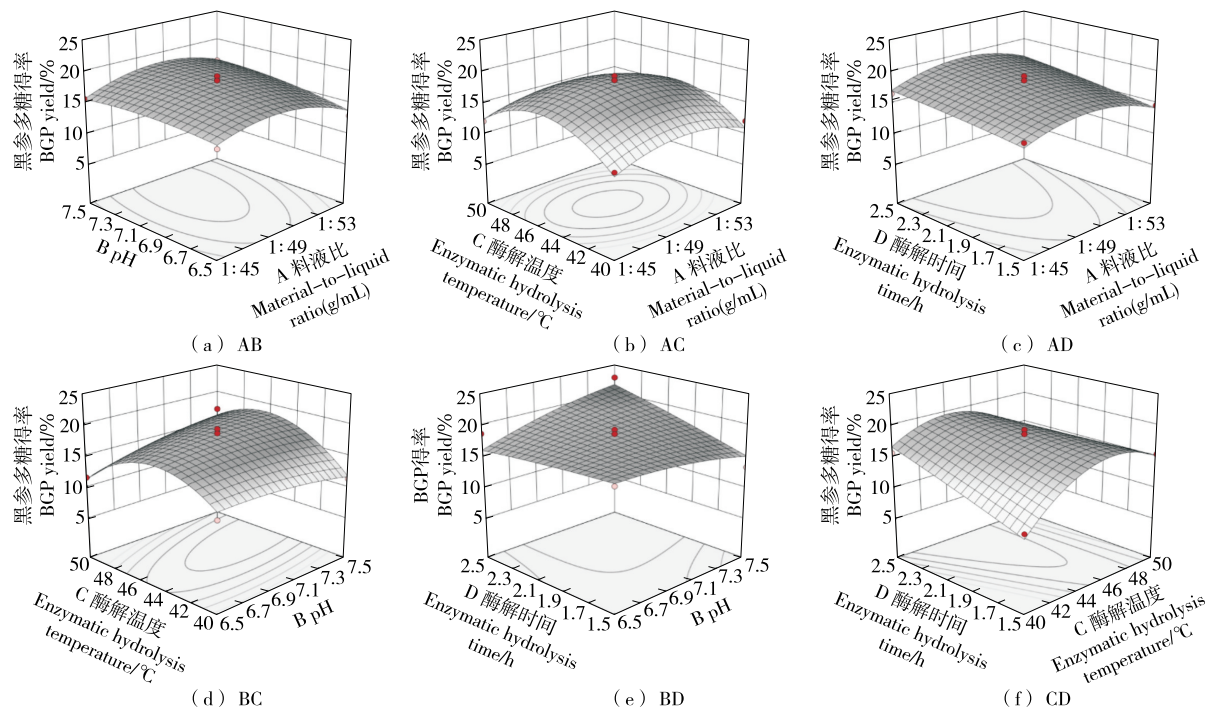


图5 各因素交互作用对BGP得率的影响

Figure 5 Effect of the interaction of various factors on BGP yield

表 5 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 5	Designs and results of Box-Behnken experiment				
试验号	A	B	C	D	BGP 得率/%
1	2	2	1	3	15.65
2	2	1	3	2	11.60
3	1	2	2	3	16.54
4	2	2	2	2	17.89
5	1	2	2	1	15.88
6	3	1	2	2	13.03
7	2	2	2	2	19.33
8	3	2	1	2	12.12
9	1	2	3	2	12.08
10	2	1	1	2	12.43
11	2	3	2	1	13.34
12	2	1	2	3	18.67
13	2	2	2	2	18.67
14	2	3	2	3	22.69
15	3	2	2	1	14.69
16	2	2	2	2	18.65
17	2	3	3	2	17.09
18	1	2	1	2	11.60
19	3	2	2	3	16.31
20	2	3	1	2	11.41
21	2	2	3	3	11.61
22	1	3	2	2	15.72
23	2	2	1	1	10.51
24	2	2	2	2	17.73
25	1	1	2	2	14.99
26	3	2	3	2	11.76
27	2	2	3	1	15.49
28	3	3	2	2	16.37
29	2	1	2	1	17.32

表 6 回归模型方差分析[†]

Table 6	Analysis of variance of regression model					
来源	平方和	自由度	标准误差	F 值	P 值	显著性
模型	234.47	14.00	16.75	9.71	<0.000 1	**
A	0.53	1.00	0.53	0.31	0.587 0	
B	6.13	1.00	6.13	3.56	0.080 3	
C	2.91	1.00	2.91	1.69	0.215 0	
D	16.90	1.00	16.90	9.79	0.007 4	**
AB	1.70	1.00	1.70	0.99	0.337 3	
AC	0.18	1.00	0.18	0.10	0.753 9	
AD	0.23	1.00	0.23	0.13	0.720 3	
BC	10.60	1.00	10.60	6.14	0.026 6	**
BD	16.00	1.00	16.00	9.27	0.008 7	**
CD	20.34	1.00	20.34	11.79	0.004 0	**
A ²	36.69	1.00	36.69	21.26	0.000 4	**
B ²	3.02	1.00	3.02	1.75	0.207 2	
C ²	137.00	1.00	137.00	79.40	<0.000 1	**
D ²	0.20	1.00	0.20	0.12	0.736 6	
残差	24.16	14.00	1.73			
失拟项	22.46	10.00	2.25	5.30	0.061 1	
误差	1.69	4.00	0.42			
总和	258.62	28.00				

[†] *表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$)。

0.050 mg/mL 质量浓度范围内,BGP 对 ABTS⁺ 自由基的清除效率与 DPPH 自由基的基本相同,在 0.05~4.00 mg/mL 质量浓度范围内,BGP 对 ABTS⁺ 自由基的清除效率与 BGP 质量浓度存在明显正相关,当质量浓度为 0.001~4.000 mg/mL 时,ABTS⁺ 自由基清除率达到 20.98%~99.36%,与维生素 C 的接近,证明 BGP 对 ABTS⁺ 自由基有一定的清除能力。

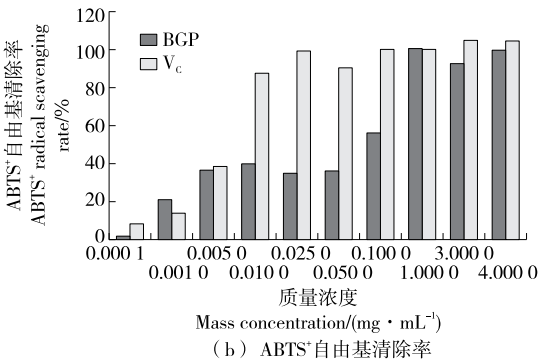
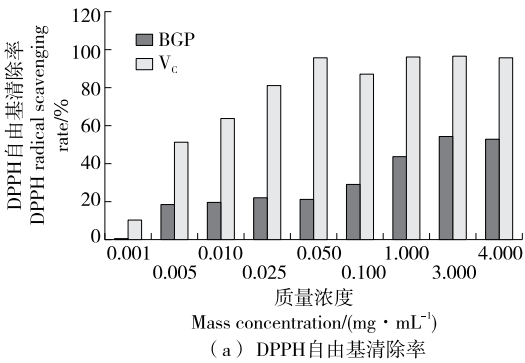


图 6 BGP 的抗氧化活性

Figure 6 Antioxidant activity of BGP

3 结论

研究以黑参药材为原料,采用复合酶法提取,通过正交试验与响应面法相结合的方法,优选出复合酶法提取黑参多糖的最佳工艺条件为纤维素酶 120 mg、果胶酶 120 mg、木瓜蛋白酶 80 mg,料液比 1:50 (g/mL),加入超纯水,用 pH 2.2 的柠檬酸—磷酸氢二钠缓冲溶液调节 pH 至 7.5,恒温水浴摇床酶解反应 2.5 h,酶解温度 45 °C,此条件下的黑参多糖得率为 (20.04±0.14)%。复合酶能够破坏植物细胞壁,并破坏多糖分子结构^[24-25],使得黑参多糖具有良好的自由基清除能力。

参考文献

- [1] 向思敏, 台雪月, 卢忠魁, 等. 黑参炮制工艺优化及成分变化分析[J]. 农产品加工, 2024(5): 41-46.
XIANG S M, TAI X Y, LU Z K, et al. Optimization of black ginseng processing technology and analysis of composition changes[J]. Farm Products Processing, 2024(5): 41-46.
- [2] 刘兴龙, 赵迎春, 陈雪艳, 等. 黑参多糖抗疲劳作用的分子机制[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 173-179.
LIU X L, ZHAO Y C, CHEN X Y, et al. Anti-fatigue effect and molecular mechanism of black ginseng polysaccharides in mice [J]. Food Science, 2020, 41(5): 173-179.
- [3] 袁元, 金河延, 于洋, 等. 白参、红参和黑参有效成分与抗氧化活性比较研究[J]. 延边大学农学报, 2019, 41(4): 14-20.
YUAN Y, JIN H Y, YU Y, et al. A comparative study on effective components and antioxidant activities in white, red and black ginseng[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2019, 41(4): 14-20.
- [4] 周君, 高亚杰, 徐亚琦, 等. 黑参的炮制、化学成分及药理活性研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2018, 37(3): 29-31.
ZHOU J, GAO Y J, XU Y Q, et al. Progress of the processing, chemical composition and pharmacological activity of black ginseng[J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2018, 37(3): 29-31.
- [5] SEO Y S, SHON M Y, KONG R, et al. Black ginseng extract exerts anti-hyperglycemic effect via modulation of glucose metabolism in liver and muscle[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 190: 231-240.
- [6] KIM M, CHOI S Y, KIM S S, et al. Function of Korean black ginseng: improvement of andropause symptoms by a complex extract of black ginseng and fenugreek in TM3 leydig cells and aged rats[J]. Journal of Ethnic Foods, 2016, 3(3): 228-234.
- [7] 李月茹, 乔雪. 黑参和生晒参中人参皂苷的比较研究[J]. 吉林医药学院学报, 2012, 33(3): 135-137.
LI Y R, QIAO X. Determination of ginsenosides in black ginseng and dry radix ginseng[J]. Journal of Jilin Medical College, 2012, 33(3): 135-137.
- [8] 韩红亮, 周修腾, Thomas Avery Garran, 等. 黑人参的炮制方法、化学成分和药理作用的研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(3): 912-920.
HAN H L, ZHOU X T, Thomas Avery Garran, et al. Research progress on processing methods, chemical constituents and pharmacological action of black ginseng[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(3): 912-920.
- [9] 孙仁爽, 赵敏婧, 隋艳艳, 等. 人参药材抗氧化活性的研究[J]. 人参研究, 2023, 35(3): 28-31.
SUN R S, ZHAO M J, SUI Y Y, et al. Studies on the antioxidant activity of ginseng herbs[J]. Ginseng Research, 2023, 35(3): 28-31.
- [10] 王聪聪. 黑参总皂苷制备工艺、化学组成及抗急性肝损伤作用的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 118.
WANG C C. Study on preparation, chemical composition and anti-acute liver injury effect of black ginseng total saponins [D]. Changchun: Jilin University, 2022: 118.
- [11] 潘玲, 马海丽, 张敏. 不同分子量黑参多糖对皮肤保湿及光损伤保护作用[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(8): 105-112.
PAN L, MA H L, ZHANG M. Skin moisturization and photoprotective effects of black ginseng polysaccharides with different molecular weights[J]. China Food Additives, 2024, 35 (8): 105-112.
- [12] 魏婷. 黑参多糖提取纯化、结构表征及生物活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 71.
WEI T. Extraction, purification, structure characterization and biological activity of polysaccharide from black ginseng[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022: 71.
- [13] 代香临, 郑启航, 胡楠楠, 等. 超声辅助酶改性典型晶型淀粉的结构及消化特性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 78-86.
DAI X L, ZHENG Q H, HU N N, et al. The structure and digestive properties of ultrasonic assisted enzyme modified typical crystalline starches[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 78-86.
- [14] 项飞兵, 熊天涵, 胡书午, 等. 复合酶法提取九资河茯苓多糖及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(9): 118-123.
XIANG F B, XIONG T H, HU S W, et al. Optimization of polysaccharide extraction from Jiuzihe *Poria cocos* with multiple enzymes and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2022, 43(9): 118-123.
- [15] 黄秋凌, 雷婷, 何子昕, 等. 苯酚—硫酸法测定消渴丸中多糖含量[J]. 中西医结合研究, 2023, 15(5): 308-310, 327.
HUANG Q L, LEI T, HE Z X, et al. Determination of polysaccharides in xiaoke pill by phenol-sulfuric acid method [J]. Research of Integrated Traditional Chinese and Western

- Medicine, 2023, 15(5): 308-310, 327.
- [16] 殷澳, 张涵, 侯相竹, 等. 朝鲜淫羊藿多糖复合酶提工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2024, 49(1): 191-200.
- YIN A, ZHANG H, HOU X Z, et al. Optimization of compound enzyme extraction process and antioxidant activity of epimedium koreanum nakai polysaccharides[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(1): 191-200.
- [17] 黄明浩, 黄泰奇, 邓丽娟. 响应面法优化白英粗多糖提取工艺及其体外抗氧化活性的分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 219-225.
- HUANG M H, HUANG T Q, DENG L J. Optimization of solanum lyratum crude polysaccharide extraction process using response surface methodology and analysis of its in vitro antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 219-225.
- [18] 吕庆银, 陈阳, 赖富丽, 等. 桑叶提取物活性成分及其抗氧化与 α -葡萄糖苷酶抑制活性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(1): 175-180.
- LYU Q Y, CHEN Y, LAI F L, et al. Antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of active components from mulberry leaf extracts[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(1): 175-180.
- [19] 张会佳, 侯相竹, 张涵, 等. 黄芪多糖复合酶提取工艺优化及其 α -葡萄糖苷酶抑制活性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 181-189.
- ZHANG H J, HOU X Z, ZHANG H, et al. Optimization of complex enzyme extraction process of astragalus polysaccharides and its α -glucosidase inhibitory activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 181-189.
- [20] 王俊杰. 黑牛肝菌多糖的提取、理化活性分析及产品开发研究[D]. 成都: 成都大学, 2024: 72.
- WANG J J. Extraction, physicochemical activity analysis and product development of polysaccharides from boletus aereus [D]. Chengdu: Chengdu University, 2024: 72.
- [21] 胡庆娟, 吴光杰, 牛庆川, 等. 响应面法优化木瓜蛋白酶法脱马齿苋多糖蛋白工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 246-252.
- HU Q J, WU G J, NIU Q C, et al. Optimization of papain-catalyzed deproteinization of polysaccharide from portulaca oleracea L. by response surface methodology[J]. Food Science, 2018, 39(20): 246-252.
- [22] 王歆彤, 李朋月, 吴兰芳, 等. 知母多糖复合酶提取工艺优化及其免疫活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 218-227.
- WANG X T, LI P Y, WU L F, et al. Optimization of multi-enzymatic extraction of polysaccharide from anemarrhena asphodeloides bunge and its immunomodulatory activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 218-227.
- [23] 郑梓威, 王馨, 吴孟仙, 等. 响应面优化生物法提取玉米淀粉的研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(6): 101-108.
- ZHENG Z W, WANG X, WU M X, et al. Optimization of biological extraction of corn starch by response surface methodology[J]. China Food Additives, 2023, 34(6): 101-108.
- [24] ZENG P J, LI J, CHEN Y L, et al. The structures and biological functions of polysaccharides from traditional Chinese herbs[J]. Progress in Molecular Biology and Translational Science, 2019, 163: 423-444.
- [25] 马潇潇, 田成, 向福, 等. 金银花中肌醇的复合酶法提取及抗氧化活性评价[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(17): 101-106.
- MA X X, TIAN C, XIANG F, et al. Optimization of enzymatic extraction conditions of inositol from flos lonicerae and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2021, 42(17): 101-106.