

超声辅助提取红豆多糖及其生物活性研究

Study on ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from red bean polysaccharides and its biological activity

邵佩¹ 庄虎² 谢超¹ 陈胜¹

SHAO Pei¹ ZHUANG Hu² XIE Chao¹ CHEN Sheng¹

(1. 武汉黄鹤楼香精香料有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 湖北中烟工业有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

(1. Wuhan Huanghelou Flavors and Fragrances Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. Hubei China Tobacco Industry Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

摘要:以超声波辅助水提取红豆多糖为原料,采用响应面法对提取工艺进行优化,并评价其抗氧化性及抑菌活性。响应面分析结果表明,红豆多糖的最佳提取工艺为:料液比($m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}}$)1:26 (g/mL),超声温度 51 °C,超声时间 94 min,此条件下多糖提取率为 $(9.92 \pm 0.04)\%$,与模型预测值基本一致。红豆多糖具有较强的总还原能力和清除 $\cdot\text{OH}$ 、 ABTS^+ 能力,且清除能力与浓度呈量效关系。此外,红豆多糖对 4 种供试菌均有抑菌活性,且对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌活性最强。

关键词:红豆;多糖;超声波辅助提取;抗氧化;抑菌

Abstract: Using ultrasonic-assisted water extracted red bean polysaccharides as raw materials, response surface methodology was used to optimize the extraction process, and its antioxidant and antibacterial activities were evaluated. Response surface analysis results shown that the best extraction process for red bean polysaccharides is material-to-liquid ratio with 1:26 (g/mL), ultrasonic temperature with 51 °C, ultrasonic time with 94 min, the extraction rate of polysaccharide under these optimal conditions is $(9.92 \pm 0.04)\%$, which is basically consistent with the predicted value of the model. Red bean polysaccharides possesses strong total reducing ability and ability to remove $\cdot\text{OH}$ and ABTS^+ , and the removal ability has a dose-effect relationship with its concentration. In addition, red bean polysaccharides shown antibacterial activity against the four tested bacteria, especially for *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*.

Keywords: red bean; polysaccharides; ultrasonic assisted extraction; antioxidant; antibacterial

红豆(*Vigna angularis* W.),属豆科豇豆属,又名红

小豆、小豆、赤小豆、赤豆,在中国陕西、江苏、广西等地方分布较广^[1]。红豆药用价值高,具有良好的健脾止泻、解毒消肿、预防肝硬化等功效^[2]。其食用价值也极高,含有丰富的蛋白质、碳水化合物,还含有多酚、多糖、黄酮等多种生物活性成分^[3]。

多糖是由 10 个以上单糖组成的聚合物高分子碳水化合物,在自然界来源广泛。研究表明,多糖具有抗氧化^[4]、抑菌^[5]、抗癌^[6]、降血糖^[7]等功能。在红豆各营养成分中多糖含量最高,其中淀粉含量约为 60%。目前对红豆的研究多集中在红豆饮料制备工艺^[8-9],红豆黄酮提取工艺^[10]、红豆淀粉提取工艺^[11]、红豆多酚抗氧化活性分析^[12]等方面,而有关红豆多糖(Red bean polysaccharides, RBP)提取工艺优化及生物活性研究极少。李粉玲等^[13]采用超声辅助法从红豆中提取多糖,抗氧化活性结果表明红豆多糖有较好的清除 O_2^- 自由基、羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的能力以及较好的总还原能力,清除率最大为 56.1%,但由于没有优化提取工艺,多糖提取率不高,导致自由基清除能力较低。任花^[14]和郝继伟^[15]分别采用正交试验优化大豆多糖的微波辅助法和超声辅助法提取工艺,多糖提取率分别为 6.64% 和 7.36%,但由于没有进行脱蛋白、除低聚糖等小分子杂质处理,多糖纯度较低。目前,采用响应面优化红豆多糖的超声辅助提取工艺尚未见报道。

试验拟以红豆为原料,采用超声辅助提取法,以料液比、超声温度、超声时间为考察因素,采用响应面法优化提取工艺,经脱蛋白、醇沉、透析工艺处理后,评价红豆多糖的抗氧化及抑菌活性,以期提高红豆多糖提取率,为红豆的进一步开发利用提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与仪器

红豆:湖北恩施生产;

作者简介:邵佩,女,武汉黄鹤楼香精香料有限公司助理工程师,硕士。

通信作者:陈胜(1972—),男,武汉黄鹤楼香精香料有限公司高级工程师,博士。E-mail:3423409845@qq.com

收稿日期:2020-07-25

透析袋:西安优博生物科技有限公司;

葡萄糖:标准品,美国 Sigma 公司;

乙醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、铁氰化钾、冰乙酸、三氯化铁、30% 双氧水、硫酸亚铁、水杨酸、过硫酸钾等试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS):标准品,上海源叶生物科技有限公司;

胰蛋白胨大豆琼脂(TSA)、胰蛋白胨大豆肉汤(TSB)培养基:青岛海博生物技术有限公司;

金黄色葡萄球菌(6538)、大肠杆菌(25922):美国标准生物品收藏中心;

沙门氏菌、枯草芽孢杆菌:由实验室保藏。

1.1.2 主要仪器设备

高速粉碎机:DFY-300 型,温岭市林大机械有限公司;

电子分析天平:AL204 型,梅特勒—托利多仪器上海有限公司;

超声波清洗机:KQ2200DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

旋转蒸发器:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

紫外—可见分光光度计:UV-1750 型,日本岛津公司;

手提式压力蒸汽灭菌锅:TX-24LDJ 型,江阴滨江医疗设备有限公司;

超净工作台:VD-1320 型,北京东联哈尔仪器制造有限公司;

生化培养箱:SHP-250 型,上海精宏实验设备有限公司。

1.2 方法

1.2.1 原料预处理 红豆样品粉碎打粉后过 60 目筛,红豆粉用 80% 乙醇溶液回流 4 h 以脱色并除去小分子多糖等,抽滤后将滤渣用无水乙醇、丙酮和乙醚分别清洗,粉末置于室温下 24 h 阴干,得红豆粉末待用^[16-17]。

1.2.2 红豆多糖的提取工艺流程

红豆粉末→超声波处理浸提→抽滤除渣→离心(8 000 r/min, 10 min)→取上清液→在上清液中加入 5% 三氯乙酸至提取液不混浊(除蛋白)^[18]→离心(8 000 r/min, 20 min)→取上清液 60 °C 下旋蒸至其体积的 1/4 左右→加入 3 倍体积的 95% 乙醇静置 24~48 h→抽滤→滤渣离心(8 000 r/min, 20 min)后取沉淀→用无水乙醇洗涤并收集沉淀→将沉淀溶于蒸馏水透析 48 h→冷冻干燥→得红豆粗多糖

1.2.3 红豆多糖含量的测定 采用苯酚—硫酸分光光度法^[16]。以葡萄糖浓度(mg/mL)为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线 $y=5.286x-0.017$, $R^2=0.999 2$ 。

取 2 mL 稀释提取液,加入体积分数 5% 苯酚溶液 1 mL 和浓 H_2SO_4 5 mL,充分混匀,室温静置 30 min,于

490 nm 处测定吸光度,并使用标准曲线计算红豆多糖含量^[19]。按式(1)计算多糖提取率。

$$Y = \frac{c \times V \times n}{m \times 1\,000} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y——多糖提取率,%;

V——多糖溶液的体积,mL;

c——葡萄糖的质量浓度,mg/mL;

n——稀释倍数;

m——红豆粉的质量,g。

1.2.4 红豆多糖提取单因素试验 准确称取 5 g 红豆粉末,用蒸馏水作溶剂,在 100 W 下进行超声提取,测定红豆多糖提取率。

(1) 料液比:固定超声温度 40 °C,超声时间 90 min,考察料液比 $[m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}}]$ 分别为 1:8,1:16,1:24,1:32,1:40 (g/mL)对红豆多糖提取率的影响。

(2) 超声温度:固定料液比 $(m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}})$ 1:24 (g/mL),超声时间 90 min,考察超声温度(20,30,40,50,60 °C)对红豆多糖提取率的影响。

(3) 超声时间:固定料液比 $(m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}})$ 1:24 (g/mL),超声温度 40 °C,考察超声时间(30,60,90,120,150 min)对红豆多糖提取率的影响。

1.2.5 响应面法优化试验设计 在单因素试验基础上利用响应面法设计超声波辅助提取的试验方法,选取料液比、超声温度、超声时间为影响因素,以红豆多糖提取率作为试验设计的响应值,根据 Box-Behnken 试验设计,利用三因素三水平的试验设计优化超声波辅助提取红豆多糖工艺参数。

1.2.6 红豆多糖体外抗氧化活性评价 根据文献[20]进行,测定红豆多糖的总还原能力,以及对 $\cdot OH$ 和 $ABTS^+$ 的清除率。

1.2.7 红豆多糖抑菌活性的测定

(1) 菌种活化:取各待测菌株于 TSA 培养基上 37 °C 下倒置培养 24 h,用生理盐水洗斜面上的菌,充分震荡使菌悬液的浓度为 10^8 CFU/mL,备用^[21]。

(2) 抑菌活力的测定:采用文献[21]中牛津杯法测定红豆多糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌和枯草芽孢杆菌的抑菌活性。将融化并冷却的 TSA 培养基倒入平板内约 15 mL,待凝固后加入 100 μL 的 10^8 CFU/mL 菌悬液采用涂布法涂布均匀,在平板标记处放置牛津杯,并于每个牛津杯中吸入 200 μL 经 0.22 μm 过滤器过滤的 10 mg/mL 多糖溶液(每组 3 个平行)。于 37 °C 培养箱培养 24 h 后,采用十字交叉法测量抑菌圈直径,以抑菌圈直径作为抑菌活力的测定指标。

(3) 最低抑菌浓度(MIC)的测定:参照李彦坡等^[22]的方法并根据实际情况有所调整。将红豆多糖分别制成

0.625,1.250,2.500,5.000,10.000,20.000 mg/mL 6 个浓度梯度,采用涂布法测定,将 1 mL 不同浓度多糖溶液与 25 mL 培养基混匀,待培养基凝固后,加入 4 种供试菌的菌悬液 100 μ L,涂布均匀后,倒置培养 24 h,每组试验平行测定 3 次。

1.2.8 数据处理 采用 Excel 2010 处理数据和统计分析, Origin 8.0 进行绘图。试验数据均重复 3 次,以平均值士标

准偏差表示,以 $P<0.05$ 表示差异显著且具有统计意义。

2 结果与分析

2.1 红豆多糖的提取工艺优化

2.1.1 单因素试验结果 由图 1 可知,料液比($m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}}$)选择 1:16~1:32 (g/mL)较合适;超声温度选择 40~60 $^{\circ}\text{C}$ 较合适;超声时间选择 60~120 min 比较合适。

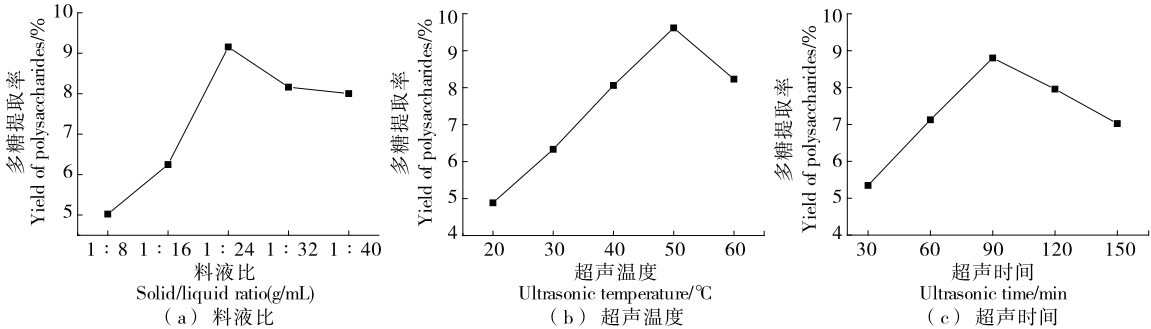


图 1 3 个因素对红豆多糖提取率的影响

Figure 1 Effects of 3 factors on extraction yields from red bean polysaccharides

2.1.2 响应面试验方案设计及结果 在单因素试验基础上,利用软件 Design-Expert 8.0.6 中的 Box-Behnken 模式对料液比、超声温度、超声时间进行三因素三水平的响应面试验设计(见表 1),试验设计方案及结果如表 2 所示。

2.1.3 回归模型及方差分析 由表 2 可知,对试验数据进行多元回归拟合^[23],得到红豆多糖提取率对料液比、超声温度、超声时间的二次多项回归方程:

$$Y=9.85+0.52A+0.39B+0.19C-0.45AB-0.06AC-0.17BC-0.81A^2-1.40B^2-0.65C^2。$$
 (2)

由表 3 可知,回归模型的 F 值为 51.52, $P<0.0001$, 该模型达到极其显著水平;失拟项 $P=0.6992>0.05$, 该模型失拟项不显著,方程拟合度高,该模型可用来预测各因素对红豆多糖提取率的影响^[24]。模型相关系数 $R^2=0.9851$,校正系数 R^2_{Adj} 为 0.9660,表明模型预测值和实测值有较好的拟合度^[25]。一次项 C 显著($P<0.05$),一次项 A 、 B 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 极显著($P<0.01$)。根据 F 值可知,3 个因素对红豆多糖提取率影响排序为 $A(\text{料液比})>B(\text{超声温度})>C(\text{超声时间})$ 。

2.1.4 因素交互作用分析 由图 2 可知,料液比和超声温度的交互作用极显著($P<0.01$),料液比和超声时间、

超声温度和超声时间的交互作用不显著($P>0.05$),该结论与方差分析结果一致。

2.1.5 最佳工艺条件的确定 利用 Design-Expert 8.0.6 软件分析得到红豆多糖的最佳提取工艺条件为:料液比($m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}}$)1:26.33 (g/mL),超声温度 50.84 $^{\circ}\text{C}$,超声

表 2 红豆多糖响应面试验方案及结果

Table 2 Response surface design arrangement and results of red bean polysaccharides

试验号	A	B	C	多糖提取率/%
1	0	-1	-1	7.09
2	0	1	1	8.17
3	0	0	0	10.02
4	1	0	-1	8.84
5	-1	1	0	8.07
6	0	0	0	10.04
7	0	0	0	9.98
8	0	0	0	9.64
9	0	1	-1	8.03
10	1	1	0	8.15
11	1	0	1	9.02
12	-1	0	1	8.05
13	0	0	0	9.57
14	-1	0	-1	7.63
15	1	-1	0	8.11
16	-1	-1	0	6.23
17	0	-1	1	7.90

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels in response surface analysis

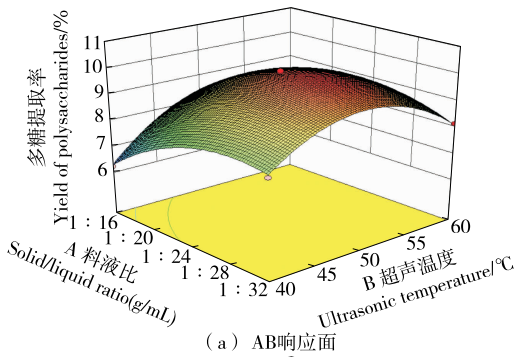
水平	A 料液比(g/mL)	B 超声温度/ $^{\circ}\text{C}$	C 超声时间/min
-1	1:16	40	60
0	1:24	50	90
1	1:32	60	120

表 3 回归方程各项的方差分析[†]

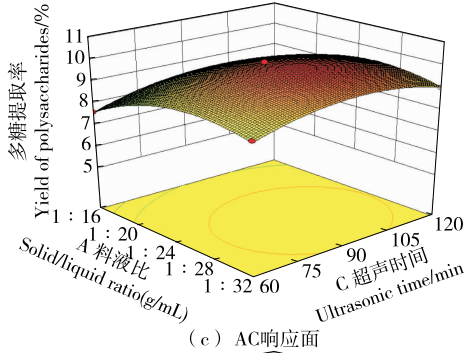
Table 3 Variance analysis of regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	18.67	9	2.07	51.52	<0.000 1	* *
A	2.14	1	2.14	53.20	0.000 2	* *
B	1.19	1	1.19	29.64	0.001 0	* *
C	0.30	1	0.30	7.46	0.029 3	*
AB	0.81	1	0.81	20.12	0.002 8	* *
AC	0.01	1	0.01	0.36	0.568 7	
BC	0.11	1	0.11	2.79	0.139 0	
A ²	2.77	1	2.77	68.82	<0.000 1	* *
B ²	8.24	1	8.24	204.58	<0.000 1	* *
C ²	1.80	1	1.80	44.69	0.000 3	* *
残差	0.28	7	0.04			
失拟项	0.08	3	0.03	0.51	0.699 2	不显著
纯误差	0.20	4	0.05			
总和	18.95	16				

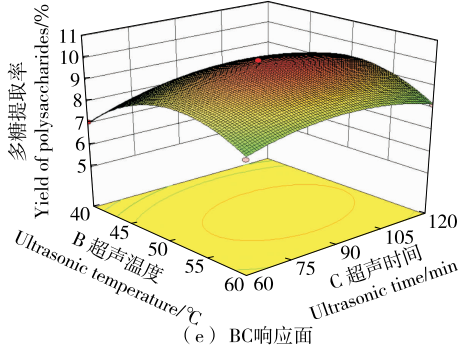
[†] P<0.01 为极显著,用 * * 表示;P<0.05 为显著,用 * 表示;P>0.05 为不显著。



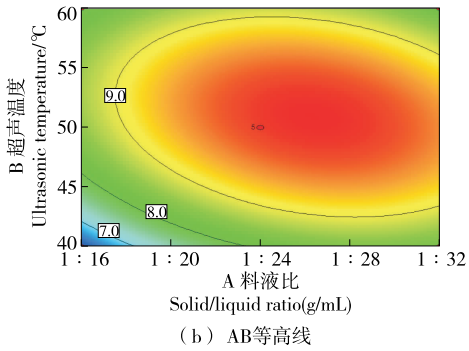
(a) AB响应面



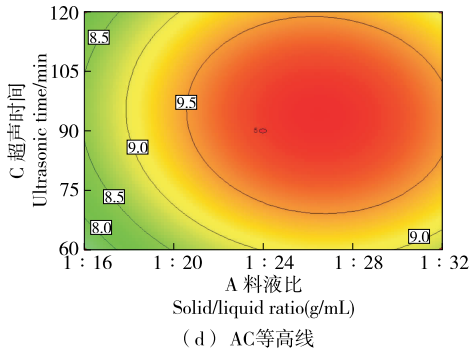
(c) AC响应面



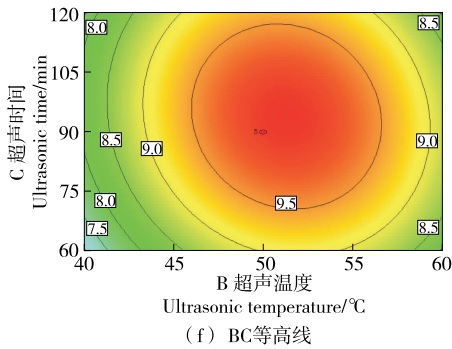
(e) BC响应面



(b) AB等高线



(d) AC等高线



(f) BC等高线

图 2 响应面及等高线图

Figure 2 Response surface and contour plots

时间 93.69 min,此条件下预测的最佳提取率为 9.95%。虽然表 2 中试验号 3 和 6 提取率>10%,但考虑到试验样品的随机性,以及预测值与试验号 3 和 6 提取率值无显著性差异(P>0.05),故以 Design-Expert 8.0.6 软件分析得出的最佳提取工艺条件进行验证实验。考虑到实际情况,将工艺条件适当调整为:料液比($m_{\text{红豆}}:V_{\text{水}}$)1:26 (g/mL),超声温度 51℃,超声时间 94 min,在该条件下进行 3 次平行试验,红豆多糖提取率平均值为(9.92±0.04)%,与预测最佳提取率基本一致,说明该模型优化结果可靠。

2.2 红豆多糖的抗氧化活性

2.2.1 总还原能力 由图 3 可知,红豆多糖的总还原能力与多糖浓度之间均呈现一定的量效关系。当多糖质量浓度为 1~5 mg/mL 时,随着浓度升高,多糖的总还原能力显著增加,与李粉玲等^[13]的结论一致。当红豆多糖质量浓度为 5 mg/mL 时,总还原能力最强,吸光值达

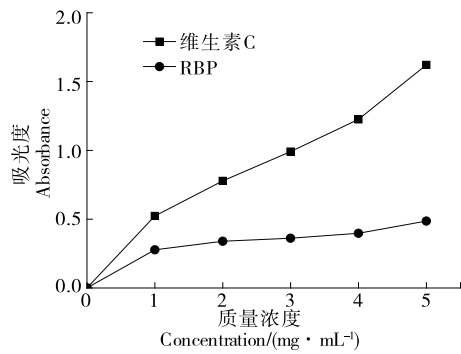


图3 红豆多糖总还原能力
Figure 3 The total reducing ability of red bean polysaccharides

(0.486 ± 0.007)。表明红豆多糖有较好的抗氧化能力,但显著弱于维生素 C 的抗氧化能力($P < 0.05$)。

2.2.2 清除 $\cdot\text{OH}$ 能力 由图4可知,当多糖质量浓度为1~5 mg/mL时,随着浓度升高多糖对 $\cdot\text{OH}$ 清除率逐渐增大。当质量浓度为5 mg/mL时,多糖对 $\cdot\text{OH}$ 清除率达(90.25 ± 1.38)%,显著低于同浓度下维生素 C 对 $\cdot\text{OH}$ 清除率($P < 0.05$)。试验结果显著高于李粉玲等^[13]研究

的红豆多糖和钟葵等^[26]研究的绿豆多糖在同质量浓度下的 $\cdot\text{OH}$ 清除率,表明红豆多糖对 $\cdot\text{OH}$ 有较强的清除能力。

2.2.3 清除 ABTS^+ 能力 由图5可知,当多糖质量浓度低于1.5 mg/mL时,多糖对 ABTS^+ 清除能力存在量效关系,随着浓度升高,多糖对 ABTS^+ 清除能力增大;当多糖质量浓度为1.5~2.0 mg/mL时,对 ABTS^+ 清除率的增长趋缓。当多糖质量浓度为2.0 mg/mL时,红豆多糖对 ABTS^+ 清除能力达到最大值(96.20 ± 3.25)%,与维生素 C 的 ABTS^+ 清除能力无显著性差异($P > 0.05$)。许海燕等^[27]研究显示桦菌芝多糖在2.0 mg/mL时对 ABTS^+ 清除率为90%,低于试验结果,表明一定质量浓度下红豆多糖对 ABTS^+ 有较强的清除能力。

2.3 红豆多糖的抑菌活性

2.3.1 抑菌圈直径 由表4可知,红豆多糖对金黄葡萄

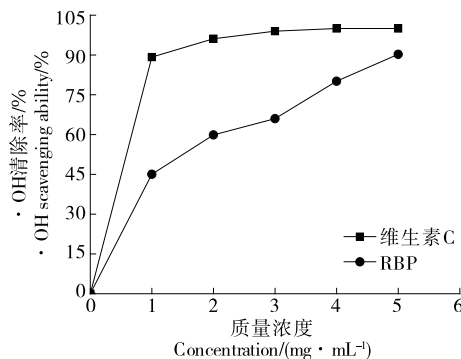


图4 红豆多糖对 $\cdot\text{OH}$ 清除率的影响
Figure 4 Effect on $\cdot\text{OH}$ scavenging ability of red bean polysaccharides

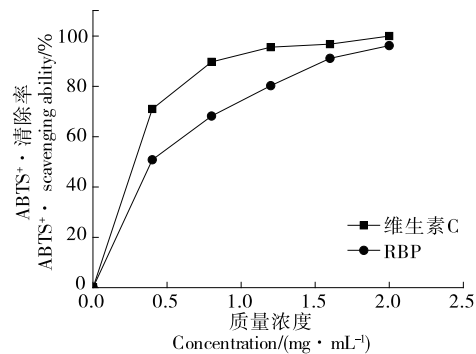


图5 红豆多糖对 ABTS^+ 清除率的影响
Figure 5 Effect on ABTS^+ scavenging ability of red bean polysaccharides

球菌、大肠杆菌、沙门氏菌、枯草芽孢杆菌具有不同程度的抑制作用,其中,红豆多糖对金黄色葡萄球菌的抑制作用最强,抑菌直径为(9.54 ± 0.22) mm,与许海燕等^[27]桦菌芝多糖对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径接近;对沙门氏菌和枯草芽孢杆菌的抑制较弱,抑菌圈直径分别为(8.24 ± 0.06), (8.19 ± 0.17) mm。红豆多糖对4种供试菌的抑制作用强弱顺序为金黄色葡萄球菌>大肠杆菌>沙门氏菌>枯草芽孢杆菌,表明红豆多糖具有良好的抑菌效果。

2.3.2 最小抑菌浓度 由表5可知,红豆多糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌、枯草芽孢杆菌的MIC值

表4 红豆多糖对4种供试菌的抑菌圈直径[†]

Table 4 Diameter of inhibition zone of red bean polysaccharide on 4 tested bacteria mm

组别	金黄色葡萄球菌	大肠杆菌	沙门氏菌	枯草芽孢杆菌
红豆多糖	9.54 ± 0.22	8.77 ± 0.31	8.24 ± 0.06	8.19 ± 0.17
无菌水(对照组)	—	—	—	—

[†] “—”表示没有抑菌圈。

表5 红豆多糖对4种供试菌的MIC[†]

Table 5 MIC of red bean polysaccharides on the four tested bacteria

红豆多糖浓度/(mg · mL ⁻¹)	金黄色葡萄球菌	大肠杆菌	沙门氏菌	枯草芽孢杆菌
0.625	—	—	—	—
1.250	—	—	—	—
2.500	+	—	—	—
5.000	+	+	—	—
10.000	+	+	+	+
20.000	+	+	+	+

[†] “—”表示无抑菌作用;“+”表示有抑菌作用。

分别为 2,500, 5,000, 10,000, 10,000 mg/mL, 说明红豆多糖金黄色葡萄球菌的抑菌作用最强, 对沙门氏菌和枯草芽孢杆菌的抑菌活性最弱。结果表明红豆多糖的抑菌活性随着浓度增大而增强, 且对革兰氏阳性菌的抑制作用强于革兰氏阴性菌。

3 结论

通过单因素和响应面试验确定了红豆多糖的最佳提取工艺条件为: 料液比 ($m_{\text{红豆}} : V_{\text{水}}$) 1 : 26 (g/mL), 超声温度 51 ℃, 超声时间 94 min, 此条件下多糖提取率为 $(9.92 \pm 0.04)\%$ 。对红豆多糖的抗氧化及抑菌活性结果显示: ① 红豆多糖具有较强的总抗氧化活性, 但总还原能力及对羟基自由基、ABTS⁺ 自由基清除能力均低于维生素 C; ② 红豆多糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、沙门氏菌和枯草芽孢杆菌均有一定的抑制作用, 且对金黄色葡萄球菌的抑菌活性最强。此外, 目前关于红豆多糖的相关报道较少, 后期研究可以从以下方面入手: ① 试验初探了红豆多糖的抗氧化及抑菌活性, 后面可对红豆多糖抗氧化活性成分构效关系及抑菌机理展开研究; ② 试验提取的红豆多糖为粗多糖, 纯度为 62%, 后续可对红豆多糖进一步分离纯化, 提高多糖纯度。

参考文献

- [1] 张波, 薛文通. 红小豆功能特性研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(9): 264-266.
- [2] 李时珍. 本草纲目[M]. 北京: 宗教文化出版社, 2001: 197.
- [3] ITOH T, KITA N, KUOKAWA Y, et al. Suppressive effect of a hot water extract of adzuki beans (*Vigna angularis*) on hyper-glycemia after sucrose loading in mice and diabetic rats [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2004, 68(12): 2 421-2 426.
- [4] LIU Kun, XIAO Xuan, WANG Jun-li, et al. Polyphenolic composition and antio-xidant, antiproliferative, and antimicrobial activities of mushroom *Inonotus sang-huang* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 154-161.
- [5] 田龙. 水溶性大豆多糖的抑菌活性研究[J]. 中国油脂, 2008, 33(12): 64-66.
- [6] ZONG Ai-zhen, CAO Hong-zhi, WANG Feng-shan. Anti-cancer polysaccharides from natural resources: A review of recent research[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1 395-1 410.
- [7] NIU Jia-mu, XU Guang-yu, JIA Shuang, et al. In Vitro Antioxidant activities and anti-diabetic effect of polysaccharide from *Schisandra sphenanthera*, in rats with type 2 diabetes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 94: 154-160.
- [8] 李欣芮, 刘畅, 单垣恺, 等. 红豆枸杞子桑葚复合饮料的工艺研究[J]. 农产品加工, 2016(12): 40-43, 46.
- [9] 关仁梅, 吴文娟, 夏敬宇, 等. 蓝莓红豆复合饮料的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(8): 134-142.
- [10] 刘建霞, 王思, 王润梅, 等. 不同品系红小豆黄酮提取与含量检测[J]. 农业与技术, 2017, 37(13): 1-3, 14.
- [11] 赵梅. 红小豆淀粉提取工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(5): 23-24.
- [12] 谢佳函, 刘回民, 刘美宏, 等. 红豆皮多酚提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 147-157.
- [13] 李粉玲, 蔡汉权, 林泽平. 红豆多糖抗氧化性及还原能力的研究[J]. 食品工业, 2014, 35(2): 190-194.
- [14] 任花. 微波辅助法提取豆渣中大豆多糖的工艺研究[J]. 轻工科技, 2015, 31(12): 21-22, 25.
- [15] 郝继伟. 超声波提取豆渣中水溶性大豆多糖工艺研究[J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 507-510.
- [16] LAI Fu-rao, WEN Qi-biao, LI Lin, et al. Antioxidant activities of water-soluble polysaccharide extracted from mung bean (*Vignaradiata* L.) hull with ultrasonic assisted treatment[J]. Carbohydrate Polymer, 2010, 81(2): 323-329.
- [17] 王立峰, 鞠兴荣, 何荣, 等. 水溶性大豆多糖的提取工艺研究[J]. 食品科学, 2010(24): 111-114.
- [18] 高丽君, 王汉忠, 崔建华, 等. 苯酚-硫酸法测定自首乌中多糖含量[J]. 山东农业大学学报, 2004, 35(2): 295-297.
- [19] 张岚, 李婷婷, 刘颖, 等. 微波辅助萃取豆渣水溶性大豆多糖工艺[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(31): 19 568-19 570.
- [20] 邵佩, 张昭, 王琳, 等. 膨大剂处理对猕猴桃多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(5): 32-40.
- [21] 胡明明. 花生壳多酚的提取、纯化及其抗氧化、抑菌活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 52.
- [22] 李彦坡, 黄艳, 程璐洁, 等. 松毛菇多酚抗氧化及抑菌活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 173-178.
- [23] 伊思静, 张天宝, 郭继虎, 等. 黄粉虫粗多糖的提取工艺优化[J/OL]. 现代食品科技. [2020-08-02]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.8.0211>.
- [24] 夏季, 郑炯, 陈光静, 等. 响应面法优化超声辅助提取野木瓜多酚工艺[J]. 食品工业科技, 2014, 35(21): 253-258.
- [25] 田明杰, 谭宏渊, 叶帆宇, 等. 福白菊总黄酮的微波辅助提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(1): 170-174.
- [26] 钟葵, 曾志红, 林伟静, 等. 绿豆多糖制备及抗氧化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2): 93-98.
- [27] 许海燕, 彭修娟, 王珊, 等. 桦菌芝多糖抗氧化性及抑菌活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 171-174.