



基于 GA-BPNN 优化铁皮石斛多糖提取工艺

李伯齐, 郭建军, 胡万哉, 梁宗锁, 侯卓妮

(浙江理工大学生命科学与医药学院, 杭州 310018)

摘要: 为了优化铁皮石斛多糖提取工艺, 采用单因素实验考察超声功率、超声时间、纤维素酶浓度、木瓜蛋白酶浓度、液料比和浸提温度等因素的影响, 然后采用正交设计试验方法安排实验, 通过 Matlab 建立三层结构的 BP 神经网络(Back propagation neural network, BPNN), 并结合遗传算法(Genetic algorithm, GA)对工艺条件进行全局寻优, 获得最佳提取工艺。结果表明: 纤维素酶会对铁皮石斛多糖造成破坏, 不利于铁皮石斛多糖提取, 而木瓜蛋白酶可显著增加对铁皮石斛多糖的提取得率; 铁皮石斛多糖的最佳提取工艺为液料比 95:1, 超声功率 400 W, 木瓜蛋白酶浓度 1400 U/g, 提取温度 48 ℃, 在此工艺条件下铁皮石斛多糖得率达 33.4%, 优于普通热水提取 23.6% 的得率, 得率提升显著, 也同时表明 BP 神经网络模型结合遗传算法能够较好地解决此类非线性求优问题。

关键词: BP 神经网络; 铁皮石斛; 多糖; 正交设计; 纤维素酶; 木瓜蛋白酶; 还原糖; 超声提取

中图分类号: R 284.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2021)09-0697-07

Optimization of the extraction process of *Dendrobium officinale* polysaccharide based on GA-BPNN

LI Boqi, GUO Jianjun, HU Wanzai, LIANG Zongsuo, HOU Zhuoni

(College of Life Sciences and Medicine, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018)

Abstract: In order to optimize the extraction process of *Dendrobium officinale* polysaccharides (DOP), single-factor experiments were used to explore the effects of factors such as ultrasonic power, ultrasonic time, cellulase concentration, papain concentration, liquid-to-material ratio, and extraction temperature. The orthogonal design method was used to arrange the experiment. A three-layer BP neural network was established through Matlab, and the genetic algorithm (GA) was adopted to carry out global optimization on the process conditions to obtain the best extraction process. The results show that cellulase can destroy DOP and is not conducive to the extraction of DOP, while papain can significantly improve the yield of DOP. The optimum extraction conditions of DOP are a liquid-to-material ratio of 95:1, an ultrasonic power of 400 W, a papain concentration of 1400 U/g and an extraction temperature of 48 ℃. Under these conditions, the yield of DOP is up to 33.4%, which is significantly better than that of ordinary hot water extraction. The yield has been significantly improved. This also fully demonstrates that the BP neural network model combined with genetic algorithm (GA-BPNN) can better solve such kind of nonlinear optimization problems.

Key words: BP neural network; *Dendrobium officinale*; polysaccharides; orthogonal design; cellulase; papain; reducing sugar; ultrasonic extraction

0 引言

铁皮石斛是兰科植物 *Dendrobium officinale* Kimura et migo 的干燥茎,具有保护胃肠道、促进体液循环、调节人体免疫功能、降低血糖、保护机体免受氧化应激损伤以及减少肿瘤发生率的作用^[1]。铁皮石斛多糖一直以来被认为是铁皮石斛中的有效成分^[2]。体外实验证明,铁皮石斛多糖可通过产生 $\text{TNF-}\alpha$ 、 $\text{IL-1}\beta$ 细胞因子实现调节免疫的作用^[3]。动物实验表明,铁皮石斛多糖可有效刺激脾细胞的增殖和 T 淋巴细胞和 B 淋巴细胞的先天免疫能力,从而实现自我免疫功能的提高^[4]。铁皮石斛多糖能激活补体受体和甘露糖受体,增强细胞因子的分泌^[5]。模型小鼠在口服石斛多糖之后,胰腺 β 细胞数量和功能产生明显改善,葡萄糖耐量和胰岛素敏感性显著提升^[6]。小鼠在经过铁皮石斛多糖灌胃治疗后,血糖浓度、胰岛素、糖化血清蛋白和血清脂质明显降低,过氧化物酶、超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶显著提升^[7]。

如何从药材中简单有效地提取多糖是一项重要的课题。传统的铁皮多糖提取工艺主要包括热水提取法^[8]、酶提取法^[9]、超声提取法^[10]和半仿生提取法^[11]等。水提法简单易行,但普遍存在提取率较低,对原料造成较大的浪费^[12]。超声提取技术能够在低温环境下,快速高效地提取多糖,因此超声提取技术在中药材提取中的应用越来越广泛^[13-15]。酶提取法利用酶对植物细胞的分解破坏,降低植物细胞内容物的传质阻力,并最大限度保留有效成分,反应条件温和,可最大限度保留提取物有效成分等优点,因此酶提取法在提取工艺中具有重要地位^[16]。纤维素酶能够通过分解组成植物细胞壁的纤维素,使细胞壁产生局部的溶解和塌陷,从而使植物细胞内容物快速溶出^[17-18]。木瓜蛋白酶可分解蛋白质,减少蛋白质与多糖的胶连作用,提升多糖的溶出效率^[19-20]。闪式提取技术也是一种在极短的时间内使溶质在溶液达到平衡的技术,此法具有提取时间短,提取效率高的特点^[11]。

BP 神经网络 (Back propagation neural network, BPNN) 是一种基于深度学习的算法,具有通过对各种复杂数据进行深度学习而拥有分类能力和优良的多维函数映射的能力^[21-22]。在计算科学和运筹学中,遗传算法是受自然选择过程启发的一种算法,可通过突变和中间或离散重组来进化个体,从而解决优化问题^[23-24]。

传统热水提取法存在提取效率低,原材料浪

费严重等问题。本文在单因素实验的基础上以超声功率、木瓜蛋白酶浓度、温度、提取时间四因素设计正交实验,建立 BP 神经网络并结合遗传算法优化提取方法,得到铁皮石斛多糖最佳提取工艺,为遗传算法结合神经网络在多元非线性求优问题中的应用中提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

铁皮石斛药材由杭州天鸿生物科技有限公司提供,木瓜蛋白酶、纤维素酶、葡萄糖、硫酸、蒽酮、3,5-二硝基水杨酸和无水亚硫酸钠购于生工生物工程(上海)有限公司,所有试剂均为分析纯。

1.2 实验仪器

XO-650D 超声细胞破碎仪(南京先欧仪器制造有限公司);LG-01 高速中药粉碎机(瑞安市百信制药机械有限公司);HWS-12 恒温水浴锅(上海一恒科技有限公司);DENVER TP-214 千分之一电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司);SYNERGY HTX 多功能酶标仪(美国伯腾仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 多糖的含量测定及得率计算

1.3.1.1 多糖的提取与测定

总糖的提取与测定参照马旖旎等^[25]方法加以改进。将铁皮石斛粉末烘干至恒重,称取 0.20 g,按照液料比 100:1 加入蒸馏水,混匀,超声提取,加入纤维素酶或木瓜蛋白酶,以 8000 r/min 离心 10 min,取上清,即得铁皮石斛水提物,稀释 100 倍,根据硫酸蒽酮法^[25]测定提取液中总糖的含量以及 DNS 法^[26]测定还原糖的含量。

1.3.1.2 多糖得率的计算

按照上述方法分别计算铁皮石斛提取液中总糖的质量以及还原糖的质量,方法参考文献^[27],具体计算方法如公式(1)所示:

$$Y/\% = \frac{C_1 \times V_1 \times k_1 - C_2 \times V_2 \times k_2}{M} \times 100 \quad (1)$$

其中:Y 表示多糖得率,%; C_1 、 C_2 分别表示测得总糖和还原糖质量浓度,mg/mL; V_1 、 V_2 分别表示测定体系的体积,mL; k_1 、 k_2 分别表示总糖测定和还原糖测定时稀释的倍数;M 表示铁皮石斛的质量,g。

1.3.2 单因素实验设计

单因素实验设计如表 1 所示,每个试验水平设 3 个平行实验组,考察各个单因素对铁皮石斛多糖得率的影响。

表 1 单因素实验

因素	变化条件	固定条件
液料比/(mL·g ⁻¹)	20:1、40:1、60:1、80:1、100:1	浸提时间 50 min, 浸提温度 50 ℃
浸提时间/min	30、60、90、120、150	液料比 100:1, 浸提温度 50 ℃
超声功率/W	0、150、300、450、600	液料比 100:1, 超声时间 5 min
超声时间/min	0、2、4、6、8	液料比 100:1, 超声功率 500 W
浸提温度/℃	30、45、60、75、90	液料比 100:1, 浸提时间 60 min
木瓜蛋白酶浓度/(U·g ⁻¹)	0、500、1000、1500、2000	液料比 100:1, 浸提时间 60 min、浸提温度 50 ℃
纤维素酶浓度/(U·g ⁻¹)	0、200、400、600、800	液料比 100:1, 浸提时间 60 min、浸提温度 50 ℃

1.3.3 正交实验设计

在单因素实验结果的基础上,选取液料比(A)、超声功率(B)、木瓜蛋白酶酶浓度(C)和水浴温度(D)作为研究因素,以多糖提取率作为优化指标,采用正交设计试验方法安排试验,优化提取工艺,因素与水平设计见表 2。

表 2 正交试验因素水平

因素	水平		
	1	2	3
A/(mL·g ⁻¹)	60:1	80:1	100:1
B/W	200	400	600
C/(U·g ⁻¹)	500	1000	1500
D/℃	40	50	60

2 结果与分析

2.1 单因素结果分析

2.1.1 液料比对多糖得率的影响

多糖得率与液料比的关系曲线如图 1 所示,由图可知,多糖得率随着液料比的增大而增加,其原因为增加液料比可增加分散介质的体积从而使铁皮石斛多糖的得率增加。考虑到随着液料比的增大,提取多糖时所需要耗费的浓缩时间,试剂消耗量都要增加,所以选取 60:1、80:1、100:1 三个水平设计正交实验。

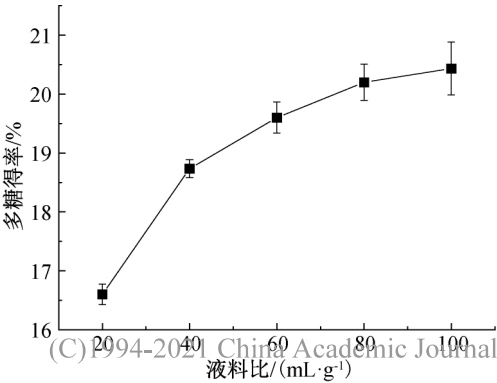


图 1 多糖得率与液料比的关系曲线

2.1.2 浸提时间对多糖得率的影响

多糖得率与浸提时间的关系曲线如图 2 所示,由图可知,在 30~90 min 范围内,多糖得率随时间增长而增加,延长时间可使多糖溶解更充分,从而增加多糖得率。在 80 min 后,各个水平没有变化,其原因可能是因为分散体系在 80 min 达到稳定的状态。

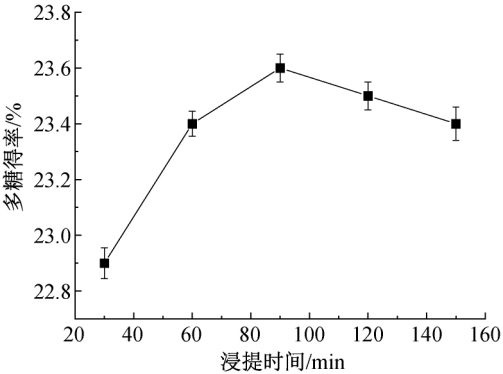


图 2 多糖得率与浸提时间的关系曲线

2.1.3 超声功率对多糖得率的影响

多糖得率与超声功率的关系曲线如图 3 所示,由图可知,多糖得率在 0~300 W 的范围内随着超声功率的变化而增大,在 300~600 W 范围内,提取率随功率的变化不明显,其原因可能是超声功率在 300 W 已能够有效地破坏铁皮石斛的细胞壁,加速多糖的溶出。

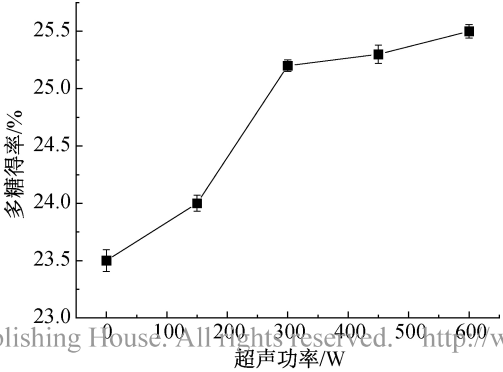


图 3 多糖得率与超声功率的关系曲线

2.1.4 超声时间对多糖得率的影响

多糖得率与超声时间的关系曲线如图4所示,由图可知,铁皮石斛多糖的多糖得率在超声提取时间0~4 min范围内随时间的增长而升高,多糖得率在超声处理4~10 min范围内趋于稳定,不随时间的增长而变化,选取超声时间为5 min作为正交实验中的超声提取条件。

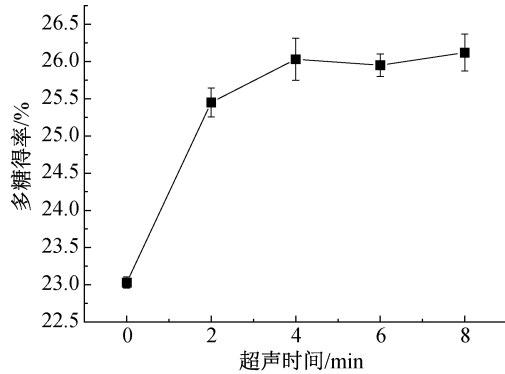


图4 多糖得率与超声时间的关系曲线

2.1.5 浸提温度对多糖得率影响

多糖得率与浸提温度的关系曲线如图5所示,由图5可知,在30~80℃的温度范围内,温度升高,得率增加。当温度达到80℃后,多糖得率下降,其原因可能是酶的最适温度小于80℃,因此选取40、50℃和60℃三个因素水平优选最佳提取温度。

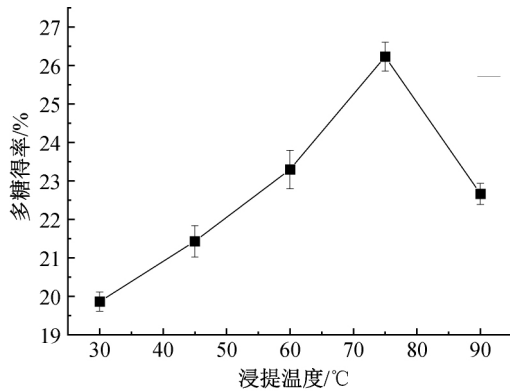


图5 多糖得率与浸提温度的关系曲线

2.1.6 木瓜蛋白酶浓度对多糖的得率影响

多糖得率与木瓜蛋白酶浓度的关系曲线如图6所示,由图可知,木瓜蛋白酶的浓度在0~1000 U/g范围内,多糖得率增加的速率较大,在1000~2000 U/g的浓度范围内,多糖得率的增加速率变慢,其原因可能是酶浓度增加,可加速溶出的速率,因此选取500、1000 U/g和1500 U/g三个水平。

2.1.7 纤维素酶浓度对多糖得率的影响

多糖得率与纤维素酶浓度如图7所示,由图可知,在0~800 U/g纤维素酶浓度范围内,多糖得率

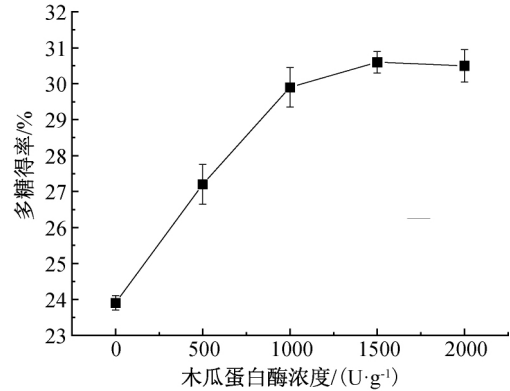


图6 多糖得率与木瓜蛋白酶浓度的关系曲线

随浓度的增长而下降,推测纤维素酶可对铁皮石斛多糖的糖苷键产生破坏,导致多糖的减少,而还原糖的含量增加。因此,在铁皮石斛多糖提取的正交实验中不考虑纤维素酶浓度。

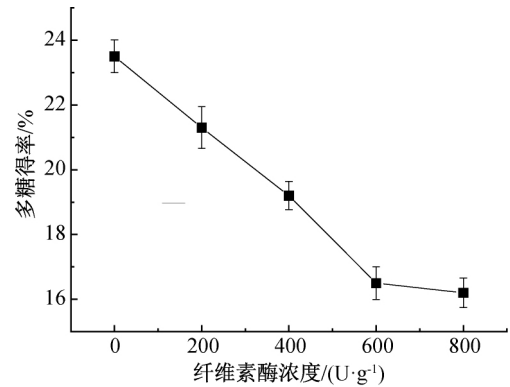


图7 多糖得率与纤维素酶浓度的关系曲线

2.2 正交设计结果方差分析

选择液料比(A)、超声功率(B)、木瓜蛋白酶浓度(C)和提取温度(D)为研究因素,以多糖得率(Y)为试验指标进行正交实验,每次实验重复3次,结果如表3所示。由表3中极差分析结果可知,各个因素的水平效应大小依次为木瓜蛋白酶浓度(4.84)、液料比(2.15)、超声功率(1.16)和提取温度(0.61)。

由表4方差分析结果可知,木瓜蛋白酶浓度与液料比水平效应非常显著,超声功率效应显著,提取温度效应不明显。综合以上结论分析得最佳提取条件为A₃B₃C₃D₃,铁皮石斛最佳提取条件为液料比100:1,超声功率600 W,木瓜蛋白酶浓度1500 U/g,提取温度为60℃。

2.3 BP神经网络建模结合遗传算法结果分析

2.3.1 BP神经网络模型的建立

本文通过Matlab 2020a软件构建3层结构的BP神经网络,输入层包含4个节点(液料比A,超声功率B、木瓜蛋白酶浓度C和提取温度D),隐藏层

表3 正交试验结果与方差分析

试验号	A/(mL·g ⁻¹)	B/W	C/(U·g ⁻¹)	D/℃	Y/%			平均得率/%
					实验1	实验2	实验3	
1	3	2	3	1	32.50	32.40	33.10	32.67
2	3	3	1	2	28.00	28.20	27.90	28.03
3	2	1	3	2	31.28	31.44	30.40	31.04
4	2	3	2	1	29.36	29.52	30.40	29.76
5	2	2	1	3	26.88	26.56	26.80	27.41
6	1	3	3	3	31.44	30.96	31.62	31.34
7	1	0	1	1	24.72	25.50	24.96	25.06
8	3	1	2	3	29.20	29.60	29.90	29.57
9	1	2	2	2	27.12	27.00	28.08	27.40
k ₁	27.93	28.55	26.83	29.16				
k ₂	29.4	29.16	28.90	28.82				
k ₃	30.08	29.71	31.68	29.44				
R	2.15	1.16	4.84	0.61				

表4 方差分析

因素	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
A/(mL·g ⁻¹)	3.800	2	1.900	7.91	**
B/W	2.372	2	1.186	4.94	*
C/(U·g ⁻¹)	36.034	2	18.017	75.07	**
D/℃	0.057	2	0.285	1.19	
误差	4.32	18	0.24		

设置8个节点,输出层为1个节点(多糖得率Y)。

2.3.2 BP神经网络虚拟样本的生成

BP神经网络基于大量样本数据能够增加神经网络预测的准确性,故通过增加虚拟样本量的方式丰富样本数据。由于每个变量(液料比,超声功率,木瓜蛋白酶浓度,提取温度,多糖得率)在实际操作中都存在一定的误差,故在每一个变量数据上增加一个波动的 Δi 值,本文中 Δi 值取0.5%,按照 $L_8(2^7)$ 正交设计,使得每个实际样本生成8个虚拟样本,由此9个实际样本可生成72个虚拟样本,再加上9个实际样本,总样本量为81个,增加了训练空间内的样本量,可提升BP神经网络的稳定性^[28]。

2.3.3 BP神经网络的训练

将此网络模型函数和参数设置为训练函数(trainlm)、最大训练迭代次数(500)、隐含层神经元的传递函数:tansig、输出层神经元的传递函数:purelin,其他参数默认。随机选取70个样本作为训练样本,剩余样本用来测试网络的性能^[29]。设定该网络模型训练次数为1000,学习速率设置为0.1,训练目标最小误差设置为0.0001,动量因子设置为0.01,输出验证样本预测输出与期望输出的相对误差。由图8可知,11个测试样本神经网络相对误差均小于 6×10^{-4} ,表明模型能够准确预测实验结果(见图8)。

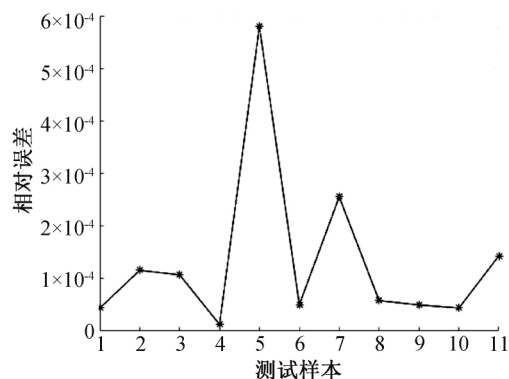


图8 神经网络预测误差图

2.3.4 遗传算法优化BP神经网络模型

遗传算法可优化网络模型的阈值以及初始权重值,使优化后的网络模型能够更好地预测未知样本^[23]。本文中,设定的参数如下,迭代进化次数:100,种群规模:20,交叉概率设置:0.75,变异概率:0.2,浮点数编码,个体长度:1,结果如图9所示。由图9所得到的最优预测多糖得率为34.78%,对应的实验条件液料比为95.3:1.0,超声功率为398.2W,酶浓度为1382.8U/g,温度为47.8℃,为最优实验条件的选择提供参考。

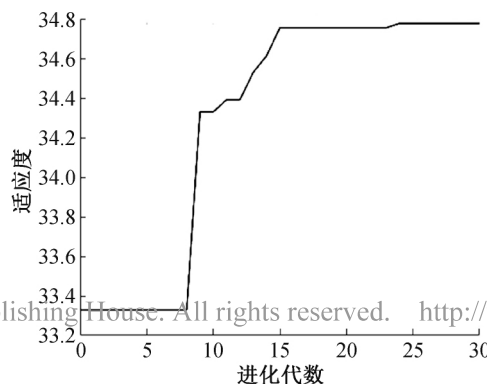


图9 适应度曲线

2.4 验证试验

根据2.3.3中遗传算法优化的结果进行试验,将BP神经网络预测的最佳提取工艺确定为液料比为95:1,超声功率为400 W,酶浓度为1400 U/g,温度为48℃,提取铁皮石斛多糖,试验重复3次,结果如表5所示。由表5可知,BP神经网络模型预测结果较方差分析预测结果具有更高的多糖得率,因此最佳提取工艺确定为液料比为95:1,超声功率为400 W,酶浓度为1400 U/g,温度为48℃。

表5 验证试验

试验	多糖得率/%	平均值/%	标准差/%
方差分析	32.9	33.4	1.87
	34.1		
	33.2		
BP神经网络建模	34.2	34.1	1.34
	34.5		
	33.6		

3 讨论

酶法提取在中药材以及食品的提取工艺中广泛应用,王占一等^[30]发现纤维素酶可用于藕节多糖的提取,纤维素酶也常用于名贵药材铁皮石斛中可溶性多糖的提取^[31-32]。薛燕等^[33]研究发现,中性蛋白酶与纤维素酶比例为2:1时,铁皮石斛多糖的得率较常规提取方法获得非常显著提升,多糖得率达到43.85%。本文结果表明,纤维素酶虽然能使提取液中总糖的得率提升,但同时使铁皮石斛中的可溶性多糖发生水解,从而导致可溶性多糖得率减小。纤维素酶作为一种复合酶,其中含有多种酶协同作用对植物细胞细胞壁产生分解破坏的作用,由于纤维素酶由于成分复杂,无法特异性识别纤维素或者铁皮石斛多糖成分,对多糖造成结构上的破坏,形成还原糖,对铁皮石斛多糖的得率是不利的。因此,纤维素酶在多糖类物质的提取时必须谨慎使用。

多糖与蛋白质等生物大分子容易在水中形成胶体,在此分散体系中,分散介质水全部被包含于高分子形成的网状结构中,形成不流动的半固体状物^[34],从而导致铁皮石斛多糖提取速率和得率降低。木瓜蛋白酶是一种低特异性蛋白水解酶,对蛋白质具有较好的水解作用^[35]。在本文中,木瓜蛋白酶能够显著提升铁皮石斛多糖得率,其原因可能是木瓜蛋白酶可以破坏分散体系中大分子之间的胶连作用,增加分散介质水的流动性,从而提升提取速率以及得率。

本文探讨液料比、浸提时间、浸提温度、超声功率、超声时间等因素对铁皮石斛多糖得率的影响。结果表明,在一定范围内提升单因素的水平均可提升铁皮石斛多糖的得率,与前人报道的结果相一致^[36]。通过增加液料比的水平,可增加分散体系中介质水的含量从而增加多糖的得率,而增加浸提时间、浸提温度、超声功率和超声时间则能够让铁皮石斛多糖溶解得更充分,更快速。本文通过正交试验进一步研究各因素对铁皮石斛多糖得率的影响,并分别通过方差分析和BP神经网络建模的方法对提取工艺进行优化,结果表明BP神经网络模型具有更好的预测效果,所得最佳工艺更加科学有效。在优化问题中,方差分析只能针对正交试验中各因素水平对提取工艺的影响,并在已知的因素水平下对提取工艺进行优化,优化结果不具有全局性,而BP神经网络模型作为一种智能信息处理系统,在结合遗传算法的条件下,能够进行全局寻优,具有全局性和科学性,因此BP神经网络模型的优化结果在多元非线性求优问题中具有一定的参考意义^[37]。

4 结论

本文在单因素试验的基础上,用正交设计安排实验,采用方差分析以及GA-BPNN进行全局优化铁皮石斛多糖最佳的提取工艺,主要结果如下:

a)通过提升液料比、浸提时间、超声功率、超声时间、浸提温度和木瓜蛋白酶浓度的因素水平可提升铁皮石斛多糖的得率,而在铁皮石斛多糖提取过程中加入纤维素酶则会减少铁皮石斛多糖得率,纤维素酶可破坏铁皮石斛多糖结构,并将其水解成还原糖。

b)对铁皮石斛多糖提取工艺的影响因素水平效应大小依次为:木瓜蛋白酶浓度、液料比、超声功率、温度。

c)BP神经网络模型寻优法能够更加全面合理地进行寻优,所得铁皮石斛多糖最佳提取工艺为液料比为95:1,超声功率为400 W,酶浓度为1400 U/g,温度为48℃在此条件下,多糖得率34.1%,大于普通提取方法。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2015:282-283. <http://www.cnki.net>
- [2] 孙乐,陈晓梅,吴崇明,等. 铁皮石斛多糖药理活性研究进展[J]. 药学报,2020,55(10):2322-2329.
- [3] He T B, Huang Y P, Yang L L, et al. Structural

- characterization and immunomodulating activity of polysaccharide from *Dendrobium officinale* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 83(2): 34-41.
- [4] Wei W, Feng L, Bao W R, et al. Structure characterization and immunomodulating effects of polysaccharides isolated from *Dendrobium officinale*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(4): 881-889.
- [5] Hui F L, Ma J J, Fan G, et al. Structural characterisation and immunomodulatory effects of polysaccharides isolated from *Dendrobium aphyllum* [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(5): 1185-1194.
- [6] Wang H Y, Li Q M, Yu N J, et al. *Dendrobium huoshanense* polysaccharide regulates hepatic glucose homeostasis and pancreatic β -cell function in type 2 diabetic mice [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 211(1): 39-48.
- [7] Chen H, Nie Q X, Hu J L, et al. Metabolism amelioration of *Dendrobium officinale* polysaccharide on type II diabetic rats[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102(5): 105582.
- [8] 张玉娜, 王倩文, 张双灵. 水提醇沉法提取香菇多糖的最佳工艺研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 43-46.
- [9] Wu Q, Qin D D, Cao H X, et al. Enzymatic hydrolysis of polysaccharide from *Auricularia auricula* and characterization of the degradation product [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162(11): 1-1994.
- [10] Medlej M K, Cherri B, Nasser G, et al. Optimization of polysaccharides extraction from a wild species of *Ornithogalum combining* ultrasound and maceration and their anti-oxidant properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161(6): 958-968.
- [11] Zhang H W, Zhang Y, Bao Y H, et al. Homogenate extraction of polysaccharides from pine nut meal: Optimization and comparison with other extraction methods by characterizing their extracts[J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020(4): 1-9.
- [12] 田燕荣, 梁晓飞, 何维维, 等. 中药多糖的提取纯化工艺研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(6): 81-83.
- [13] 李辉. 超声提取柚皮黄酮类化合物工艺的研究[J]. 现代农村科技, 2020, 1(7): 77-78.
- [14] 刘运伟, 李占君. 响应面优化塔拉籽油超声提取工艺研究[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 64-69.
- [15] 钟玲, 尹蓉莉, 张仲林. 超声提取技术在中药提取中的研究进展[J]. 西南军医, 2007, 1(6): 84-87.
- [16] 陆岩, 陆丹丹, 刘瑞月, 等. 响应面法优化纤维素酶辅助提取蛹虫草中虫草素工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(6): 127-132.
- [17] 王银霞, 王宏社. 酶在天然产物活性成分提取中的应用[J]. 广东化工, 2020, 47(11): 141-145.
- [18] 希力阿扎提·阿不力米提, 詹羽姣, 王亮, 等. 酶辅助超声提取阿尔泰金莲花总黄酮工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(4): 68-75.
- [19] 丁霄霄, 李凤伟, 商曰玲, 等. 灵芝多糖的复合酶法提取工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(5): 34-39.
- [20] 窦雨横. 酶解法提取在香菇多糖提取中的应用和进展[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(3): 34-37.
- [21] 何明. 大学计算机基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2015: 240.
- [22] 栾正禧. 中国邮电百科全书[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993: 637.
- [23] 郑树泉. 工业智能技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019: 250-251.
- [24] 王铁方. 计算机基因学[M]. 北京: 知识产权出版社, 2016: 93-94.
- [25] 马旖旎. 不同区域铁皮石斛成分差异分析与指纹图谱建立研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017: 38-40.
- [26] 高文军, 李卫红, 王喜明, 等. 3,5-二硝基水杨酸法测定蔓菁中还原糖和总糖含量[J]. 中国药业, 2020, 29(9): 113-116.
- [27] 吴劲轩, 殷浩, 夏文银, 等. 不同加工工艺和反复冻融对桑叶茶活性成分含量的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 57-63.
- [28] 唐静, 袁秀芝. BP神经网络结合遗传算法优化黄芪多糖提取工艺[J]. 中国医院药学杂志, 2018, 38(15): 1609-1611.
- [29] 马建春, 李勇. 正交试验和人工神经网络模型优化通痹凝胶贴剂提取工艺[J]. 药学研究, 2019, 38(4): 201-204.
- [30] 王占一, 赵静, 朱天顺, 等. 纤维素酶辅助提取藕节多糖工艺优化及其动力学、热力学研究[J]. 中成药, 2020, 42(4): 836-842.
- [31] 尚喜雨. 水提法·酶法提取铁皮石斛多糖的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(18): 9787-9788.
- [32] 唐政, 陈小香, 黄献珠. 混合酶提法提取铁皮石斛中石斛多糖的优化工艺研究[J]. 北方园艺, 2014, 1(6): 132-134.
- [33] 薛燕, 敢小双, 黄开丽, 等. 铁皮石斛多糖复合酶法提取工艺及其抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 215-219.
- [34] 方亮. 药剂学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2016: 208-210.
- [35] 熊华. 木瓜蛋白酶的应用研究进展[J]. 四川食品与发酵, 2005, 4(41): 9-11.
- [36] 金蓉, 谢文华, 陈杰标, 等. 超声辅助热水提取对铁皮石斛水溶性多糖得率和结构的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(2): 196-204.
- [37] 杨岩, 肖佳妹, 王韧, 等. 人工神经网络在中药相关研究领域的应用[J]. 中草药, 2019, 50(13): 3230-3236.

(责任编辑:唐志荣)