

# 响应面法优化黑灵芝膳食纤维提取工艺

殷鹏飞,李 昌,聂少平,王君巧,戴 君,谢明勇\*

(南昌大学,食品科学与技术国家重点实验室,江西南昌 330047)

**摘要:**以黑灵芝为原料,采用酶法和化学法联用,从黑灵芝中提取出可溶性膳食纤维和不可溶性膳食纤维,借助响应面设计分析,考察酶解温度、酶解时间、料液比和碱提pH、碱提温度、碱提时间分别对黑灵芝可溶性膳食纤维(SDF)、不可溶性膳食纤维(IDF)得率的影响。结果表明,最佳提取工艺条件分别为:酶解温度98℃、酶解时间103min、料液比1:32和碱提pH10、碱提温度48℃、碱提时间41min,在此条件下黑灵芝SDF得率为1.08%,IDF得率为88.68%。

**关键词:**黑灵芝,可溶性膳食纤维,不可溶性膳食纤维,响应面分析

## Extraction of dietary fiber from *Ganoderma atrum* with response surface optimization

YIN Peng-fei, LI Chang, NIE Shao-ping, WANG Jun-qiao, DAI Jun, XIE Ming-yong\*

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** Response surface methodology was applied to optimize the extraction conditions of soluble dietary fiber (SDF) and insoluble dietary fiber (IDF) from *Ganoderma atrum*. Effects of enzymolysis temperature, reaction time and material-liquid ratio on the yield of SDF and alkaline extraction pH, temperature and time on the yield of IDF were investigated. Results exhibited that the optimum extraction conditions were as follows: enzymolysis temperature and reaction time was 98℃ and 103min, solid-liquid ratio was 1:32, alkaline extraction pH, temperature and time was 10, 48℃, 41min. The yield of SDF and IDF was 1.08% and 88.68%, respectively, under optimized conditions.

**Key words:** *Ganoderma atrum*; insoluble dietary fiber; soluble dietary fiber; response surface analysis

中图分类号: TS202.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2013)14-0228-05

随着物质生活水平的提高,三高食品和精细食品在人们日常饮食的比例不断加大,高血脂、肥胖症、脂肪肝、胆结石、糖尿病及肠癌等“文明病”呈递增趋势增加<sup>[1]</sup>,因此吃出健康的饮食口号已经得到了人们的认可。基于此,膳食纤维(Dietary Fiber, DF)的在人体内不提供能量、不提供营养辅助因子,并伴有调节胃肠道消化功能,调节人体血糖、血脂水平<sup>[2-3]</sup>等生理功能越来越受到大众的重视。目前,膳食纤维已被列为“第七类营养素”<sup>[4]</sup>,而且已有大量关于膳食纤维的生理功能<sup>[5-7]</sup>和提取工艺优化的研究<sup>[8-10]</sup>。灵芝作为一类典型的菌类,其膳食纤维(主要是功能性多糖)在降血糖<sup>[11]</sup>、抗衰老<sup>[12]</sup>、抗肿瘤<sup>[13]</sup>、调节免疫力<sup>[14]</sup>等功效作用方面得到广泛的关注和研究。本文通过响

应面软件优化黑灵芝中可溶性膳食纤维(SDF)、不可溶性膳食纤维(IDF)的提取工艺,操作方法简单,环节易于控制,可以为黑灵芝的综合开发与利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

黑灵芝 产自江西赣州安远县,含氮量2.1%,灰分含量2.6%,水分含量12.5%,脂肪含量0.9%;耐高温 $\alpha$ 淀粉酶 酶活力20000U/mg,杰能科中国生物工程有限公司;中性蛋白酶 酶活力5000U/mg,无锡市雪梅酶制有限公司;三羟甲基氨基甲烷TRIS、2-(N-吗啉代)-磺酸基乙烷(MES) 纯度>99%;盐酸、氢氧化钠、无水乙醇、丙酮、95%乙醇 分析纯试剂。

数显恒温水浴锅 金坛市城西春兰实验仪器厂;AL 104型电子天平 上海梅特勒-托利多仪器有限公司;RE-52AA型旋转蒸发器、循环水真空泵 上海亚荣生化仪器厂;pH计 德国Sartorius;TDL-5-A型离心机 上海飞鸽系列离心机;DZG-6050型真空干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;ALPHA1-2型

收稿日期:2013-01-24 \* 通讯联系人

作者简介:殷鹏飞(1987-),男,硕士研究生,研究方向:食物资源开发与利用。

基金项目:十二五科技支撑计划(2012BAD33B06);国家自然科学基金重点项目(31130041);国家自然科学基金(21265011)。

展[J]. 贵州农业科学,2011,39(2):161-164.

[16] 廖维良,赵美顺,杨红. 超声波辅助提取技术研究进展[J]. 广东药学院学报,2012,28(3):347-350.

[17] Wu N, Fu K, Fu Y J, et al. Antioxidant activities of extracts and main components of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves[J]. Molecules, 2009, 14(3): 1032-1043.

冷冻干燥机 德国Martin Christ。

### 1.2 SDF、IDF的制备

SDF、IDF制备的工艺流程见图1。称取3.0g粉碎干燥后的黑灵芝，按照1:10、1:20、1:30、1:40、1:50的料液比加入pH为8.0±0.1的MES-TRIS缓冲溶液，搅拌均匀后，放入80、85、90、95、100℃恒温水浴锅中加入定量的耐高温α淀粉酶酶解40、60、80、100、120min，样品冷却到60℃加入定量中性蛋白酶酶解30min，过滤，所得滤液浓缩至10mL，加4倍95%乙醇处理醇沉过夜，在4800r/min离心15min，得到沉淀，洗涤，冷冻干燥，称重，即得SDF。

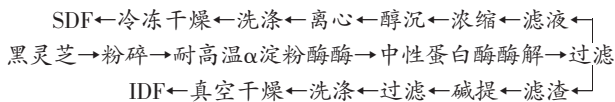


图1 SDF、IDF制备的工艺流程

Fig.1 Extraction process of SDF and IDF

过滤所得滤渣，按照料液比1:30加入MES-TRIS缓冲溶液放入25、35、45、55、65℃恒温水浴锅，调节pH为9、10、11、12、13，时间为30、40、50、60、70min，过滤，洗涤至中性，真空干燥，称重，即得IDF<sup>[15]</sup>。

参照以上过程提取膳食纤维后，计算其得率，公式如下：

$$\text{膳食纤维得率}(\%) = \frac{\text{所得样品质量}}{\text{原样品质量}} \times 100$$

### 1.3 单因素实验和响应面设计优化实验

分别选取酶解时间、料液比、酶解温度三因素进行黑灵芝可溶性膳食纤维单因素实验，选取碱提pH、碱提温度、碱提时间三因素进行黑灵芝不可溶性膳食纤维单因素实验，每个单因素实验重复3次。在单因素实验结果基础上，根据Box-Behnken的中心组合实验设计原理分别对影响SDF、IDF得率的三个因素：酶解温度(X<sub>1</sub>)、酶解时间(X<sub>2</sub>)、料液比(X<sub>3</sub>)和碱提pH(X'<sub>1</sub>)、碱提温度(X'<sub>2</sub>)、碱提时间(X'<sub>3</sub>)（每组3个平行）进行响应面三因素三水平实验，实验因素及水平见表1和表2。

表1 SDF因素水平表

Table 1 Factors, levels and codes of SDF's Box-Behnken design

因素	水平		
	-1	0	1
X <sub>1</sub> 酶解温度(℃)	90	95	100
X <sub>2</sub> 酶解时间(min)	80	100	120
X <sub>3</sub> 料液比(g/mL)	1:20	1:30	1:40

表2 IDF因素水平表

Table 2 Factors, levels and codes of IDF's Box-Behnken design

因素	水平		
	-1	0	1
X' <sub>1</sub> 碱提pH	9.5	10	10.5
X' <sub>2</sub> 碱提温度(℃)	35	45	55
X' <sub>3</sub> 碱提时间(min)	35	40	45

### 1.4 数据分析与处理

利用Origin 75和Design-Expert 8.05软件分别进行图表绘制、数据处理和分析，根据响应面Box-Behnken中心设计原理找到最佳模型组合并对黑灵芝SDF、IDF提取实验进行验证。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑灵芝SDF单因素提取实验

2.1.1 耐高温α淀粉酶酶解时间对黑灵芝SDF得率的影响 实验方法按照1.2中的实验操作过程，料液比1:30，酶解温度90℃，确定最佳酶解时间，结果见图2。

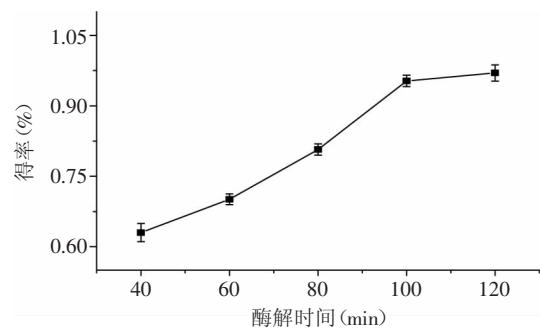


图2 酶解时间对SDF得率的影响

Fig.2 Effect of hydrolysis time on the extraction yield of SDF

图2可知，随着时间的增加，SDF得率整体趋势是一个先增大后趋于平稳的过程。当时间在40~100min时，SDF的得率随着时间的增加而快速增加，增加幅度高达30%，而当酶解时间超过100min时，可溶性膳食纤维得率的增加速度开始放缓并趋于平缓。从实际和经济角度考虑，时间选择100min较为适宜。

2.1.2 料液比对黑灵芝SDF得率的影响 实验方法按1.2中的实验操作过程，酶解温度90℃，酶解时间100min，确定最佳料液比，结果见图3。

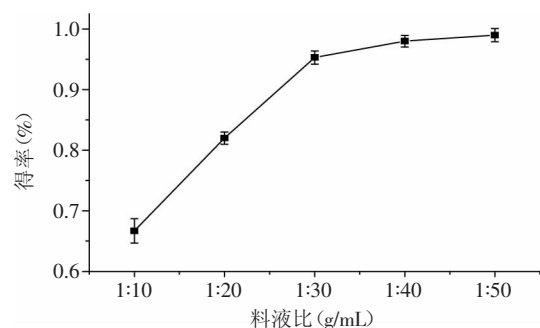


图3 料液比对SDF得率的影响

Fig.3 Effect of material-to-liquid ratio on the extraction yield of SDF

图3可知，随着料液比的增加，SDF得率是一个增加的过程。当料液比值在1:10~1:30时，SDF的得率的增幅较大，但当料液比值在1:30~1:40时，SDF得率的增加量开始放缓。当料液比达到1:50时，SDF得率增加已趋于平缓。从后续实验处理的工作量考虑，料液

比选择1:30最为适宜。

2.1.3 耐高温 $\alpha$ 淀粉酶酶解温度对黑灵芝SDF得率的影响 实验方法按照1.2中的实验操作过程,料液比1:30,酶解时间100min,确定最佳酶解温度,结果见图4。

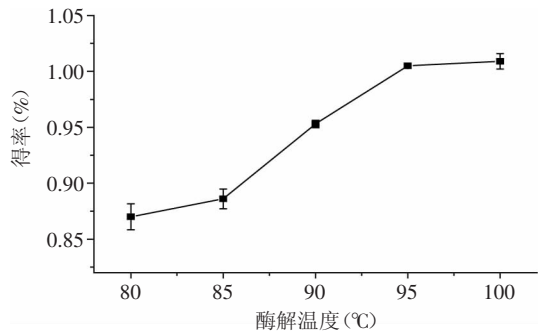


图4 酶解温度对SDF得率的影响

Fig.4 Effect of temperature on the extraction yield of SDF

图4可知,随着温度的增加,SDF提取率先增大后趋于平稳,且变化趋势显著。当酶解温度小于85°C时,SDF的得率随着温度的增加而增加但比较缓慢,当酶解温度在85~95°C之间时,SDF得率呈现出快速增加的过程。当温度超过95°C时,随着温度的增加SDF得率略有增加,但增幅较小。从实际和经济角度,温度选择95°C最为适宜。

## 2.2 黑灵芝IDF单因素提取实验

2.2.1 pH对黑灵芝IDF得率的影响 实验方法按1.2中的实验操作过程,料液比1:30,碱提时间50min,碱提温度75°C,确定最佳pH,结果见图5。

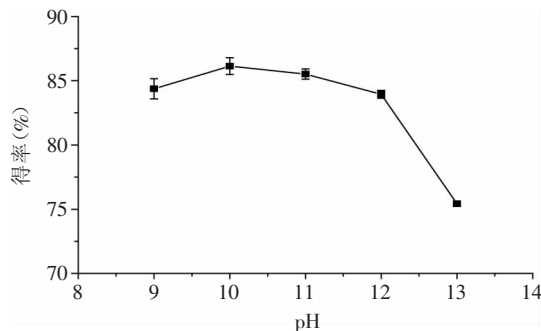


图5 pH对IDF得率的影响

Fig.5 Effect of pH on the extraction yield of IDF

图5可知,随着pH的不断增大,IDF得率整体是一个先缓慢增大后下降的过程,且变化趋势明显。当碱提pH在9~10之间变化时,IDF得率有一个明显增加趋势,但当pH>10时,IDF得率开始呈现下降趋势;当pH在12~13之间时,得率下降趋势最为明显,可能是当NaOH浓度过大时,破坏纤维素和半纤维之间的氢键,从而使得IDF的得率下降<sup>[6]</sup>,因此从得率最优考虑pH10最为适宜。

2.2.2 碱提时间对黑灵芝IDF得率的影响 实验方法按1.2中的实验操作过程,料液比1:30,pH10,碱提温度65°C,确定最佳碱提时间,结果见图6。

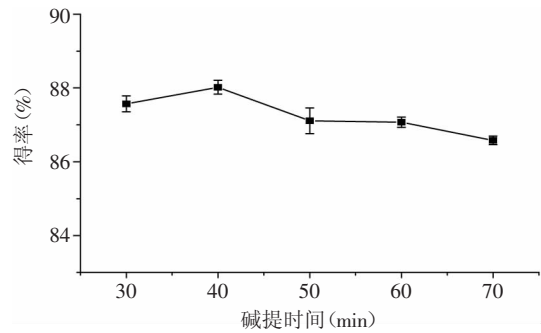


图6 碱提时间对IDF得率的影响

Fig.6 Effect of extraction duration on yield of IDF

图6可知,随着碱提时间的增加,IDF得率呈现出先增大后下降的过程,但在下降过程中50~60min之间出现一个得率基本稳定不变的过程。当碱提时间在30~40min内时,IDF的得率出现随着时间增加而增加的过程,但当时间超过40min时得率明显呈现下降趋势,并在40~50min内下降趋势最为显著。因此从实验结果整体趋势来看,碱提作用时间40min最为适宜。

2.2.3 碱提温度对黑灵芝IDF得率的影响 实验方法按1.2中的实验操作过程,料液比1:30,pH10,碱提时间40min,确定最佳碱提温度,结果见图7。

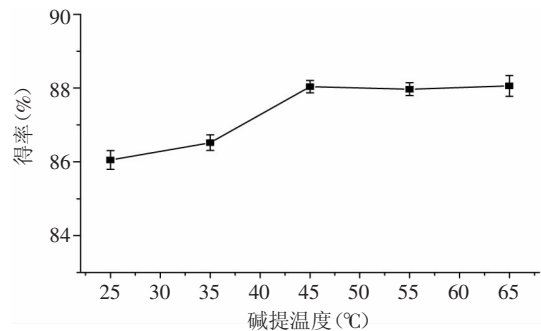


图7 碱提温度对IDF得率的影响

Fig.7 Effect of temperature on yield of IDF

由图7可知,随着碱提温度的增加,IDF得率是一个先增大后趋于平稳的过程,当碱提温度在25~45°C时,IDF的得率是随着温度的增加而增加的过程,尤其在35~45°C时增幅最快,但当温度超过45°C时得率基本保持同一水平,因此温度45°C最为适宜。

## 2.3 黑灵芝SDF、IDF提取工艺优化

依据Design-Expert 8.05软件中的中心组合设计选项,得到黑灵芝SDF、IDF提取的三因素三水平实验设计及结果,见表3和表4。

按照表3实验数据进行多元回归方程拟合,可建立以黑灵芝SDF得率(Y)对酶解温度( $X_1$ ),酶解时间( $X_2$ ),料液比( $X_3$ )的拟合方程为: $Y=1.07+0.049X_1+0.039X_2+0.045X_3-0.022X_1X_2-0.02X_1X_3+5.0\times 10^{-3}X_2X_3-0.032X_1^2-0.087X_2^2-0.069X_3^2$ 。

按照表4实验数据进行多元回归方程拟合,可建立以黑灵芝IDF得率(Y)对碱提pH( $X'_1$ ),碱提温度

表3 SDF响应面实验结果

Table 3 Response surface test results of SDF

实验号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y SDF得率 (%)
1	-1	-1	0	0.83
2	1	1	0	1.02
3	-1	1	0	0.97
4	-1	0	-1	0.85
5	1	-1	0	0.97
6	0	1	1	0.99
7	0	-1	-1	0.84
8	0	-1	1	0.92
9	1	0	-1	0.99
10	-1	0	1	0.98
11	1	0	1	1.04
12	0	1	-1	0.89
13	0	0	0	1.05
14	0	0	0	1.08
15	0	0	0	1.06
16	0	0	0	1.08
17	0	0	0	1.06

表4 IDF响应面实验结果

Table 4 Response surface test results of IDF

实验号	X' <sub>1</sub>	X' <sub>2</sub>	X' <sub>3</sub>	Y IDF得率 (%)
1	1	0	1	88.14
2	-1	0	1	87.88
3	-1	-1	0	86.67
4	1	0	-1	88.23
5	0	-1	-1	87.66
6	0	1	-1	88.12
7	-1	1	0	87.90
8	1	1	0	88.02
9	-1	0	-1	87.02
10	0	-1	1	87.67
11	1	-1	0	87.80
12	0	1	1	88.30
13	0	0	0	88.65
14	0	0	0	88.60
15	0	0	0	88.50
16	0	0	0	88.88
17	0	0	0	88.80

(X'<sub>2</sub>), 碱提时间 (X'<sub>3</sub>) 的拟合方程为:  $Y=88.69+0.34X'_1+0.32X'_2+0.12X'_3-0.25X'_1X'_2-0.24X'_1X'_3+0.042X'_2X'_3-0.60X'_1{}^2-0.48X'_2{}^2-0.26X'_3{}^2$ 。

对黑灵芝SDF、IDF响应面实验结果进行方差分析, 结果见表5和表6。

由表5可知, 模型 $F=65.09, p<0.0001$ 显著, 失拟项 $F=1.16, p=0.4289>0.05$ 不显著, 决定系数 $R^2=0.9882$ , 校正系数 $R^2_{Adj}=0.9730$ 。由表6可知, 模型 $F=26.76, p=0.0001<0.01$ 显著, 失拟项 $F=0.91, p=0.5102>0.05$ 不显著, 决定系数 $R^2=0.9718$ , 校正系数 $R^2_{Adj}=0.9354$ 。可得知以上两个模型显著, 且决定系数、校正系数均大于0.8, 说明模型拟合程度好, 因此可以利用以上两模

型预测黑灵芝SDF和IDF得率。

从表5中可以看出黑灵芝SDF模型建立中一次项和二次项均对SDF表现出极显著影响, 交互项X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>、X<sub>1</sub>X<sub>3</sub>对SDF的影响表现为显著水平, 而交互项X<sub>2</sub>X<sub>3</sub>对SDF不具有显著水平影响。从实验结果可以看出各因素对黑灵芝SDF得率的影响为X<sub>1</sub>>X<sub>3</sub>>X<sub>2</sub>, 即酶解温度对SDF得率影响最大, 其次是料液比、酶解时间。

从表6中看出黑灵芝IDF模型中一次项中的X'<sub>1</sub>、X'<sub>2</sub>和二次项都对IDF表现出极显著影响, 交互项X'<sub>1</sub>X'<sub>2</sub>、X'<sub>1</sub>X'<sub>3</sub>对IDF的Y值影响表现为显著水平, 而模型中一次项X'<sub>3</sub>、交互项X'<sub>2</sub>X'<sub>3</sub>则对Y值不具有显著水平影响, 从实验结果可以看出各因素对黑灵芝IDF得率

表5 SDF回归方程方差分析表

Table 5 Analysis of variance of established regression model for SDF yield

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	p>F	显著性
模型	0.11	9	0.013	65.09	<0.0001	**
X <sub>1</sub>	0.019	1	0.019	98.95	<0.0001	**
X <sub>2</sub>	0.012	1	0.012	62.52	<0.0001	**
X <sub>3</sub>	0.016	1	0.016	84.31	<0.0001	**
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	2.025×10 <sup>-3</sup>	1	2.025×10 <sup>-3</sup>	10.54	0.0141	*
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	1.6×10 <sup>-3</sup>	1	1.6×10 <sup>-3</sup>	8.33	0.0235	*
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	1×10 <sup>-4</sup>	1	1×10 <sup>-4</sup>	0.52	0.494	
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	4.244×10 <sup>-3</sup>	1	4.244×10 <sup>-3</sup>	22.09	0.0022	**
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0.032	1	0.032	164.9	<0.0001	**
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0.02	1	0.02	105.1	<0.0001	**
残差	1.3451×10 <sup>-3</sup>	7	1.9211×10 <sup>-4</sup>			
失拟项	6.251×10 <sup>-4</sup>	3	2.0831×10 <sup>-4</sup>	1.16	0.4289	
纯误差	7.21×10 <sup>-4</sup>	4	1.81×10 <sup>-4</sup>			
总和	0.11	16				
	R <sup>2</sup> =0.9882		R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub> =0.973			

注:  $p<0.01$ , 极显著差异\*\*;  $p<0.05$ , 显著差异\*; 表6同。



表6 IDF回归方程方差分析表  
Table 6 Analysis of variance of established regression model for IDF yield

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	p>F	显著性
模型	5.44	9	0.6	26.76	0.0001	**
X' <sub>1</sub>	0.92	1	0.92	40.92	0.0004	**
X' <sub>2</sub>	0.81	1	0.81	35.68	0.0006	**
X' <sub>3</sub>	0.12	1	0.12	5.1	0.0585	
X' <sub>1</sub> X' <sub>2</sub>	0.26	1	0.26	11.28	0.0121	*
X' <sub>1</sub> X' <sub>3</sub>	0.23	1	0.23	9.98	0.0159	*
X' <sub>2</sub> X' <sub>3</sub>	7.225×10 <sup>-3</sup>	1	7.225×10 <sup>-3</sup>	0.32	0.5895	
X' <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1.54	1	1.54	68.02	<0.0001	**
X' <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0.99	1	0.99	43.68	0.0003	**
X' <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0.29	1	0.29	13.01	0.0087	**
残差	0.16	7	0.023			
失拟项	0.064	3	0.021	0.91	0.5102	
纯误差	0.094	4	0.023			
总和	5.6	16				
	R <sup>2</sup> =0.9718			R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub> =0.9354		

的影响顺序为X'<sub>1</sub>>X'<sub>2</sub>>X'<sub>3</sub>,即pH对IDF得率影响最大,其他依次是碱提温度、碱提时间。

#### 2.4 提取工艺验证实验

分别对SDF、IDF得率取最大值,由软件自动分析可得到SDF、IDF提取工艺最优条件理论值为:酶解温度98.2℃,酶解时间102.96min,料液比1:32.38,得率1.09%和碱提pH10.09,碱提温度47.86℃,碱提时间40.82min,得率88.77%。考虑实际操作方便,选取酶解温度98℃,酶解时间103min,料液比1:32和碱提pH10,碱提温度48℃,碱提时间41min进行3次平行实验,黑灵芝SDF、IDF得率分别为1.08%、88.68%,与理论值较为接近,说明该数学模型的建立对黑灵芝可溶性、不可溶性膳食纤维的预测比较准确。

### 3 结论

在单因素实验基础上,利用响应面软件,以酶解温度、酶解时间、料液比三因素和碱提pH、碱提温度、碱提时间三因素为实验因素,分别对黑灵芝SDF、IDF为响应值进行模型建立和模型预测,得出SDF、IDF最佳提取工艺条件分别为:酶解温度98℃,酶解时间103min,料液比1:32和碱提pH10,碱提温度48℃,碱提时间41min,在此条件下黑灵芝SDF得率为1.08%,IDF得率为88.68%,说明该数学模型对优化黑灵芝膳食纤维提取工艺可行,并为综合利用黑灵芝提供了理论依据。

#### 参考文献

- [1] 黄凯丰,杜明凤. 膳食纤维研究进展[J]. 河北农业科学, 2009, 13(5): 53-55.
- [2] 王淑红. 膳食纤维对控制血糖的作用[J]. 中华中西医杂志, 2006, 4(11): 117.
- [3] 袁尔东,郑建仙. 不同品种膳食纤维降血脂功能的比较[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(3): 38-41.

[4] 冯丽君,吴巧凤. 膳食纤维的保健作用与分析方法研究进展[J]. 浙江预防医学, 2008, 20(7): 59-60.

[5] Phillips G O, Cui S W. An introduction: evolution and finalisation of the regulatory definition of dietary fibre[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 139-143.

[6] 曹荣安,贾建,李良玉,等. 膳食纤维的生理功能特性及其在食品工业中的应用[J]. 肉类研究, 2010(2): 76-78.

[7] Elleuch M, Bedigian D, Roiseux O, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review [J]. Food Chemistry, 2011, 124(2): 411-421.

[8] 丁晨阳,韩舜愈,盛文军,等. 响应曲面法优化苹果渣可溶性膳食纤维提取工艺[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 266-270.

[9] 李昊虬,王国泽,孙晓宇. 响应面法优化河套蜜瓜皮水溶性膳食纤维提取工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 254-256.

[10] 宋燕,罗松明,向建军,等. 响应面法优化花椒籽不可溶性膳食纤维提取工艺研究[J]. 中国油脂, 2011, 36(7): 62-67.

[11] He C Y, Li W D, Guo S X, et al. Effect of polysaccharides from Ganoderma lucidum on streptozotocin-induced diabetic nephropathy in mice[J]. Journal of Asian Natural Products Research, 2006, 8(8): 705-711.

[12] 张汇,鄢嫣,聂少平,等. 黑灵芝不同部位多糖成分分析及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2011, 32(1): 56-61.

[13] 李建军,雷林生,余传林,等. 灵芝多糖抗肿瘤作用的免疫学相关性研究[J]. 中药材, 2007, 30(1): 71-73.

[14] 李文娟,聂少平,余强,等. 黑灵芝多糖对免疫抑制小鼠的免疫调节作用[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 297-299.

[15] 吴笑臣,王科军,钟金莲,等. 响应面法优化脐橙渣中水溶性膳食纤维提取工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 109-114.

[16] 李加兴,梁先长,黄诚,等. 响应面法优化火棘水不溶性膳食纤维提取工艺[J]. 食品科学, 2011, 32(14): 118-123.