

# 径向基神经网络结合近红外光谱技术分析安络小皮伞发酵组分的研究

宋佳<sup>1</sup> 李臣亮<sup>1</sup> 邢高杨<sup>1</sup> 孟庆繁<sup>1</sup> 逯家辉<sup>1</sup> 曹家铭<sup>1</sup> 周毓麟<sup>1</sup> 王迪<sup>1\*</sup> 滕利荣<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 吉林大学生命科学学院, 吉林 长春 130012; <sup>2</sup> 吉林大学珠海学院, 广东 珠海 519041)

**摘要** 采用径向基神经网络(RBFNN)结合近红外光谱(NIRS)技术建立一种分析安络小皮伞发酵菌丝体中甘露醇、多糖和腺苷三种组分的定量分析模型。收集164个安络小皮伞液体发酵菌丝体样本的近红外光谱数据,采用常规方法分别测定样本中甘露醇、多糖和腺苷的含量。在应用蒙特卡罗偏最小二乘法(MCPLS)识别异常样本、确定校正集样本数量的基础上,以逼近度( $D_a$ )为评价指标,采用可移动窗口径向基神经网络(MWRBFNN)筛选特征波长变量,筛选最佳光谱预处理方法、隐含层节点数(NH)等模型参数。建立甘露醇、多糖和腺苷组分定量分析模型,最佳RBFNN-NIRS模型中校正集和预测集样本实验测定值与预测值间相关系数分别为0.9274、0.9009、0.9440和0.9354、0.9018、0.8847,表明模型具有很好的拟合度和预测性能。

**关键词** 光谱学;近红外光谱;蒙特卡罗偏最小二乘法;径向基神经网络;安络小皮伞

中图分类号 O657.33; R927.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1230001

## Study on Analyzing Active Ingredient of *Marasmius androsaceus* via Radial Basis Function Neural Network Combining with Near Infrared Spectroscopy

Song Jia<sup>1</sup> Li Chenliang<sup>1</sup> Xing Gaoyang<sup>1</sup> Meng Qingfan<sup>1</sup> Lu Jiahui<sup>1</sup> Cao Jiaming<sup>1</sup>  
Zhou Yulin<sup>1</sup> Wang Di<sup>1</sup> Teng Lirong<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Life Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)  
(<sup>2</sup> Zhuhai College, Jilin University, Zhuhai, Guangdong 519041, China)

**Abstract** Radial basis function neural network (RBFNN) combining with near infrared spectroscopy (NIRS) is applied to develop quantitative analyzing models of mannitol, polysaccharide and adenosine in *Marasmius androsaceus* fermentation mycelium. Using submerge fermentation, 164 *Marasmius androsaceus* mycelium samples are obtained. The contents of mannitol, polysaccharide and adenosine are determined via traditional methods and the near infrared spectroscopy data of the 164 samples are collected. The outliers are removed and the number of calibration set is confirmed via Monte Carlo partial least square (MCPLS) method. Based on the values of degree of approach ( $D_a$ ), the moving window radial basis function neural network (MWRBFNN) is applied to optimize characteristic wavelength variables, pre-processing methods, hidden layer nodes (NH) and spreads in the models. The quantitative analyzing models of mannitol, polysaccharide and adenosine in *Marasmius androsaceus* fermentation mycelium are developed successfully. The correlation coefficients between the reference values and predictive values of mannitol, polysaccharide and adenosine in both of the calibration set and validation set of optimum RBFNN-NIRS models are 0.9274, 0.9009, 0.9440 and 0.9354, 0.9018, 0.8847 respectively. All the data suggest that these models possess excellent fitness and predictive ability.

**Key words** spectroscopy; near infrared spectroscopy; Monte Carlo partial least square; radial basis function neural network; *Marasmius androsaceus*

**OCIS codes** 300.6340; 260.3060; 200.4260; 200.3050; 070.4790

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-07-23

基金项目: 教育部科技支撑项目基金(2012BAL29B05)

作者简介: 宋佳(1986—),男,博士研究生,主要从事药物的非破坏在线质量控制等方面的研究。

E-mail: tjsongjia@126.com

导师简介: 滕利荣(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事药物有效成分的分离与新药开发等方面的研究。

E-mail: tenglr@jlu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jluwangdi@gmail.com

## 1 引言

安络小皮伞(*Marasmius androsaceus*), 别称鬼毛针、茶褐小皮伞, 可供食用, 常用于治疗跌打损伤、偏头痛以及骨折疼痛<sup>[1]</sup>。在国内, 以安络小皮伞为原料的“安络痛”广泛应用于坐骨神经痛、三叉神经痛和风湿性关节炎等疾病的治疗。安络小皮伞提取物主要成分为甘露醇、多糖、蛋白质、氨基酸等<sup>[2]</sup>。药理学研究表明其主要成分除镇痛外, 还具有抗脂质氧化<sup>[3]</sup>及拮抗高血压<sup>[4]</sup>的作用, 本课题组已成功证实安络小皮伞深层液体发酵产物具有很好的镇痛及抗抑郁活性。目前, 安络小皮伞主要依赖于人工培养, 而不同的培养条件及培养基成分, 对其有效成分含量有极大影响。

近红外光谱(NIRS)技术, 具有快速、简便、对样本无损等特点, 广泛应用于食物和药物的定性及定量分析中<sup>[5-7]</sup>。但相较于传统测定方法, NIRS携带的有效信息率略低、信息弱、波谱复杂且易受到测试物质背景的影响, 产生较大误差。径向基神经网络(RBFNN), 又被称作局部感受域神经网络, 具有很强的非线性拟合性能, 且稳定、训练速度快而不受初始权值的影响, 克服了误差反传网络收敛慢、权重调整复杂和较易落入局部极优点等缺陷<sup>[8-10]</sup>。由于近红外光谱反应物质的振动和转动的能级使其相邻波长具有很好的相关性, 采用可移动窗口径向基神经网络法(MWRBFNN)可筛选影响模型预测能力的特征波长变量。蒙特卡罗偏最小二乘法(MCPLS)通过大量随机计算和评估有效地识别模型中异常样本并优选校正集和预测集样本数<sup>[11]</sup>, 从而达到良好的模型稳健性并提高了模型泛化能力。本课题组成功利用RBFNN结合NIRS建立了测定蛹虫草菌丝体中有效成分的定量分析模型<sup>[12]</sup>。

本文应用径向基神经网络结合近红外光谱法(RBFNN-NIR)建立安络小皮伞发酵组分检测技术, 以达到快速定量测定安络小皮伞菌丝中甘露醇、多糖和腺苷含量的目的, 该方法可应用于安络小皮伞原料药的检测中, 并且能够推广至其他真菌类原料药的质量控制。

## 2 实验部分

### 2.1 材料、试剂与设备

安络小皮伞菌株(T-08 CCTCC M2013175)于中国典型培养物保藏中心保藏。

甘露醇标准品、腺苷标准品(美国Sigma公司);

甲醇(北京化工色谱); 高碘酸钠、盐酸、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、 $KH_2PO_4 \cdot 3H_2O$ 、葡萄糖均为分析纯; 维生素 $B_1$ 、蔗糖、蛋白胨、酵母浸粉均为生化试剂。

日本岛津UV-3150型紫外可见近红外分光光度计, 日本岛津ISR-3100积分球附件, 全自动在位灭菌发酵系统, 日本岛津LC-10AT高效液相色谱仪。

### 2.2 样本制备

以安络小皮伞菌株T-08 CCTCC M2013175为出发菌株, 通过化学诱变法获得大量诱变安络小皮伞菌株。通过液体深层发酵制备安络小皮伞菌丝体, 冻干粉碎过80目筛得安络小皮伞菌粉备用。发酵条件如下: 接种量7%(体积比), 装液量150~250 mL/500 mL, 摇床转速120~180 r/min, 发酵温度23℃~28℃, 发酵时间5 d。培养基: 20 g/L蔗糖, 10 g/L蛋白胨, 10 g/L酵母浸粉, 1 g/L  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , 1 g/L  $KH_2PO_4 \cdot 3H_2O$ , 0.1 g/L维生素 $B_1$ 。

应用UV-3150型紫外可见近红外分光光度计和ISR-3100积分球附件扫描供试样本近红外光谱, 扫描波长范围为800~2000 nm, 光谱通带密度为12 nm,  $BaSO_4$ 标准品作为空白, 光谱采样间隔为1 nm, 每个样本扫描3次, 取其均值为样本光谱数据。

### 2.3 分析方法

#### 2.3.1 样本中腺苷含量的测定<sup>[13]</sup>

根据2010版《中国药典》中介绍的方法, 采用高效液相色谱(HPLC)法测定菌丝体中腺苷的含量。

#### 2.3.2 样本中胞内多糖含量的测定<sup>[14]</sup>

采用蒽酮硫酸法测定胞内多糖含量。

#### 2.3.3 样本中甘露醇含量的测定<sup>[15]</sup>

利用比色法测定菌丝体中甘露醇的含量。

### 2.4 建立RBFNN分析模型

程序脚本的编写采用Matlab2010(美国mathwork)软件执行。

#### 2.4.1 MCPLS法识别异常样本

采用留一交互验证法, 以交互验证均方根误差作为评价指标, 筛选初始隐变量数( $n_{LV}$ ), 计算公式如(1)式所示, 当结果为校正集时, (1)式表达校正集均方根误差(RMSEC); 当结果为预测集时, (1)式表达预测集均方根误差(RMSEP)。

$$X_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (y_p - y_r)^2}{n}}, \quad (1)$$

式中 $n$ 为样本数量,  $y_p$ 为真实值,  $y_r$ 为计算值或者预测值。

随机选择50%的样本作为预测集建立偏最小

二乘法(PLS)定量分析模型,重复计算 10000 次,以确保每个样本都有作为预测集的机会,计算过程中记录每个预测集样本的预测残差(PRE),最终计算

它们的平均值(MPRE)和标准偏差(SDPRE),筛选出具有较高 MPRE 和 SDPRE 的样本作为异常样本予以剔除。

表 1 安络小皮伞菌丝体样本中甘露醇、多糖和腺苷含量统计

Table 1 Statistical data of mannitol, polysaccharide and adenosine content in *Marasmius androsaceus*

	Component	Sample number	Average / (g/g)	Range
Calibration set	Mannitol	113	0.0110	0.0196~0.2124
	Polysaccharide	96	0.0700	0.0082~0.1379
	Adenosine	107	0.0057	0.0037~0.0077
Validation set	Mannitol	49	0.0114	0.0227~0.1777
	Polysaccharide	63	0.0780	0.0137~0.1401
	Adenosine	47	0.0059	0.0040~0.0079

### 2.4.2 选择校正集样本数并分集

适宜的校正集及预测集样本数可以保证模型具有良好的泛化能力,并防止过拟合现象。随机选择 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80% 和 90% 的样本数量作为校正集样本,其余作为预测集,建立 PLS 分析模型,根据(2)式,计算拟合度( $D_f$ )。每个校正集比率重复计算 50000 次,计算  $D_f$  平均值(MDF),当 MDF 达到最高时,即选择该比例作为校正集样本数。

$$D_f = \frac{c}{\frac{X_{RMSEC}}{n_c} + \frac{X_{RMSEP}}{n_p} + |X_{RMSEC} - X_{RMSEP}|}, \quad (2)$$

式中  $n_c$  为校正集样本数, $n_p$  为预测集样本数,常数  $c$  在测定甘露醇、多糖和腺苷时分别为 0.0025、0.02 和 1。

### 2.4.3 建立 RBFNN 分析模型

利用快速傅里叶变换(FFT),卷积光滑,一阶导数和二阶导数等方法对原始光谱进行预处理,考察窗口为 5、7、9、11 和 13 时的除噪效果。从第一个波长点(800 nm)开始,将  $W$  个波长变量定义为一个窗口(窗口大小为  $W$ ),对不同的隐含层节点数(NH)和初始的扩展常数分别建立 RBFNN 分析模型。从第一个波长点(800 nm)开始移动窗口,顺次替换一个波长点重复建立 RBFNN 分析模型,直至最后的光谱点(2000 nm)进入窗口。实验中 NH 取值范围为 1~15,间隔为 1; $W$  取值范围为 20~180(所有波长点数的 2%~15%),间隔为 20。按照(3)式计算各个模型的逼近度( $D_a$ ),当  $D_a$  值达到最高时,采用其前  $n_w$  (50~150,间隔为 10)个窗口波长变量组合建模。在选择特征波长变量的基础上,对初始扩展常数(0.4~4.8,间隔为 0.4)和 NH 进行优化。

$$D_a = \frac{c}{\frac{n_c}{n_t} X_{RMSEC} + \frac{n_p}{n_t} X_{RMSEP} + |X_{RMSEC} - X_{RMSEP}|}, \quad (3)$$

式中  $n_t$  为所有样本数, $n_c$  为校正集样本数, $n_p$  为预测集样本数,常数  $c$  同(2)式所述。

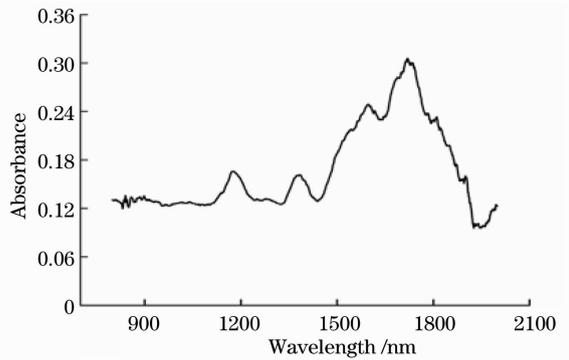


图 1 安络小皮伞菌丝体样本光谱数据

Fig. 1 Spectral data of *Marasmius androsaceus* samples

## 3 结果与讨论

### 3.1 样本近红外光谱

安络小皮伞菌丝体样本的近红外光谱如图 1 所示,在 1100~1200 nm、1350~1470 nm、1550~1650 nm、1700~1800 nm 之间具有显著吸收峰,该段区域主要是 C-H 和 O-H 等分子键吸收峰及分子化合键二级倍频的吸收峰,800~900 nm 间有若干小峰,表明谱线复杂且各组分特征信息难以简单分辨和解读。

### 3.2 异常样本的剔除

异常样本通过 MCPLS 法进行筛选,MPRE 和 SDPRE 值均较高的样本被认作异常样本并予以剔除。在建立安络小皮伞菌丝体甘露醇、多糖和腺苷 NIRS 定量分析模型过程中,分别剔除 3、5 和 11 个异常样本(图 2)。

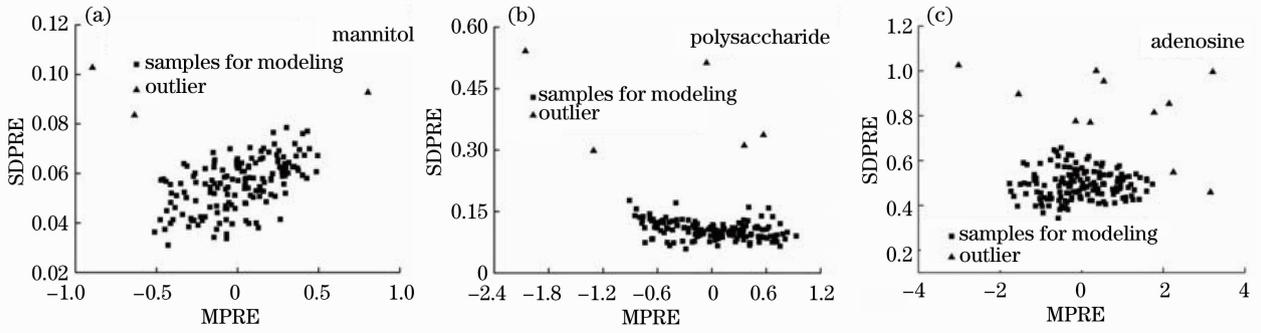


图 2 通过 MPRE 和 SDPRE 对比选择异常样本。(a)甘露醇；(b)多糖；(c)腺苷

Fig. 2 Sample selection for modeling via MPRE versus SDPRE. (a) Mannitol; (b) polysaccharide; (c) adenosine

### 3.3 校正集样本数的选择

利用 MCPLS 法选择建立安络小皮伞菌丝体甘露醇、多糖和腺苷 NIRS 定量分析模型的校正集样本数,当 MDF 值达到峰值时,此时的比例将作为校正集所占总样品的比例数。安络小皮伞菌丝体甘露醇、多糖和腺苷 NIRS 定量分析模型的校正集所占比例分别为 70%、60%和 70%(图 3)。校正集与预测集样品中各有效成分含量统计结果如表 1 所示。

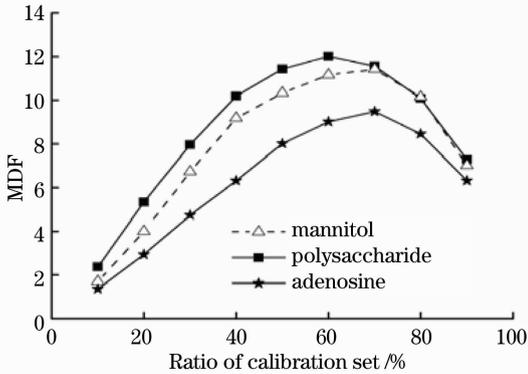


图 3 不同校正集比例对 MDF 值的影响

Fig. 3 Influence of calibration set ratio on MDF

### 3.4 RBFNN-NIRS 定量分析模型建立

采用 RBFNN 结合 NIRS 建立安络小皮伞菌丝体中甘露醇、多糖和腺苷组分定量分析模型。采用 MWRBFNN 法对原始光谱的  $W$ 、 $NH$  和扩展常数等重要参数进行初步优化<sup>[16]</sup>。结果表明,建立甘露醇、多糖和腺苷含量的分析模型时,当  $W$  为 120、120 和 100,  $NH$  为 11、3 和 5, 扩展常数为 2.4、3.6 和 2.0 时,  $D_a$  值最大,即模型效果最好(图 4)。

在初步优化结果的基础上,分别进行了各个预处理后光谱的参数优化,结果如表 2 所示。近红外光谱能够反映出物质的理化性质,但来自于背景、噪声及重叠的影响也会被记录,近红外光谱涵盖的变量要远远高于其样本数量<sup>[17]</sup>。本研究分别采用快速傅里叶变换、卷积光滑、一阶导数和二阶导数法对原始光谱进行预处理以达到消除噪声污染的目的,利用快速傅里叶变换和二阶导数处理后数据建立的甘露醇及多糖定量分析模型明显优于原始光谱(表 2);但是在减少干扰的同时预处理也会降低光谱信息量,因此在建立腺苷组分定量分析模型时,最佳光谱选择原始光谱(表 2)。经过优选, RBFNN-NIRS 安络小皮伞菌丝体中甘露醇、多糖和腺苷组分定量

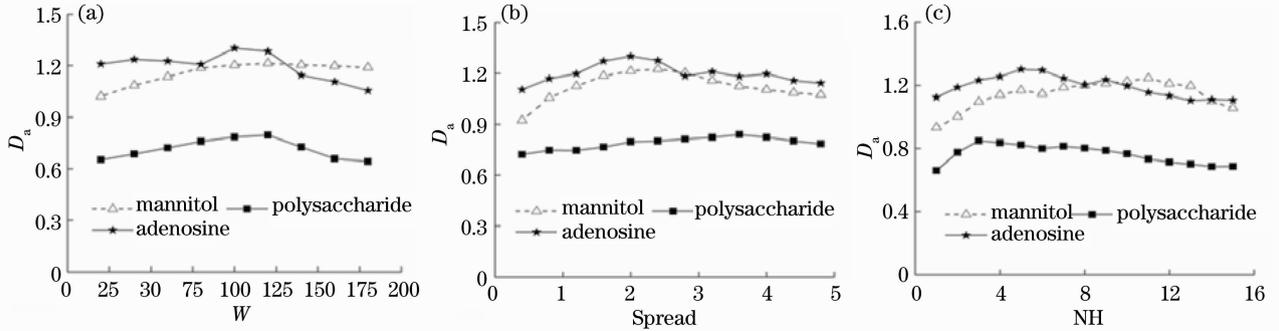


图 4 (a)  $W$ , (b) 扩展常数和 (c)  $NH$  值对 RBFNN 分析模型中安络小皮伞样本甘露醇、多糖和腺苷成分分析的影响

Fig. 4 Influence of (a)  $W$ , (b) spread and (c)  $NH$  on  $D_a$  during the RBFNN models developed for analyzing the content of mannitol, polysaccharide and adenosine in *Marasmius androsaceus*

分析模型的最适  $W$  值均为 100;最佳的  $n_w$  值分别为 60、60 和 50;最优的隐含层节点数分别为 7、2 和 5;最佳扩展常数分别为 2.4、4.4 和 2.0。

在得到安络小皮伞菌丝体甘露醇、多糖和腺苷含量的最佳 RBFNN 模型基础上,进行模型预测值

与真实值间相关性的考察(图 5),结果显示,模型预测能力良好,并未出现过拟合现象,三个模型的  $R_c^2$  和  $R_p^2$  分别为 0.9274、0.9009、0.9440 和 0.9354、0.9018、0.8847。

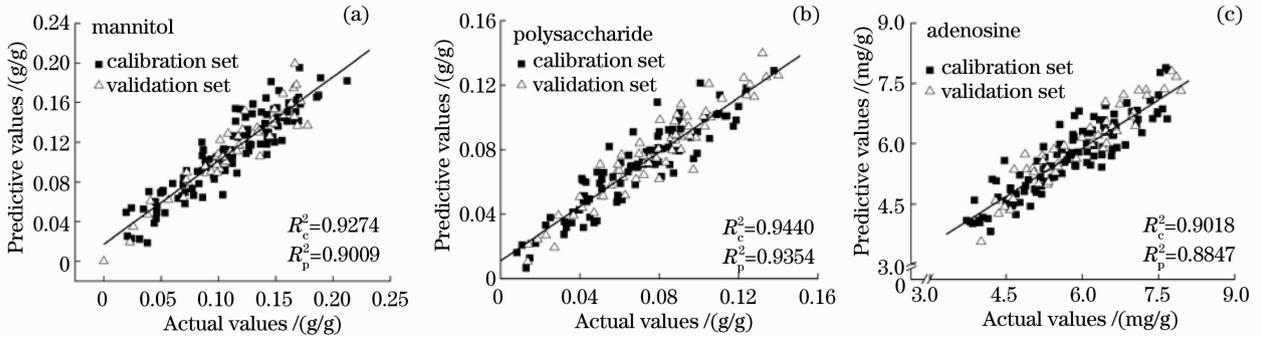


图 5 最佳 RBFNN-NIRS 分析模型中校正集和预测集样本真实值和预测值的相关性。(a)甘露醇;(b)多糖;(c)腺苷  
Fig. 5 Correlation between reference values and predictive values in both of the calibration set and validation set of optimum RBFNN-NIRS models. (a) Mannitol; (b) polysaccharide; (c) adenosine

表 2 甘露醇、多糖和腺苷含量分析径向神经网络模型最适结果汇总

Table 2 Results of suitable spectrum preprocessing methods and related indexes in RBFNN-NIRS models of mannitol, polysaccharide and adenosine

Components	Preprocessing methods	Windows	$W$	$n_w$	RMSEC / (g/g)	RMSEP / (g/g)	$D_a$	NH	Spread
Mannitol	Original spectra	120	80	0.0181	0.0196	1.2452	11	2.4	
	Savitzky-Golay smoothing	7	80	70	0.0184	0.0191	1.2963	4	2.0
	FFT	5	100	60	0.0165	0.0175	1.4003	7	2.4
	First order derivative	11	160	80	0.0179	0.0181	1.3718	5	2.4
	Second order derivative	9	120	100	0.0186	0.0183	1.3271	6	2.8
Polysaccharide	Original spectra	120	110	0.0134	0.0207	0.8486	3	3.6	
	Savitzky-Golay smoothing	11	160	90	0.0126	0.0220	0.7750	1	0.8
	FFT	9	180	60	0.0125	0.0188	0.9401	3	3.6
	First order derivative	13	120	60	0.0123	0.0179	0.9927	4	1.2
	Second order derivative	7	100	60	0.0127	0.0177	1.0127	2	4.4
Adenosine	Original spectra	100	50	$0.4791 \times 10^{-3}$	$0.7008 \times 10^{-3}$	1.3014	5	2.0	
	Savitzky-Golay smoothing	9	140	60	$0.4864 \times 10^{-3}$	$0.7458 \times 10^{-3}$	1.2123	6	1.6
	FFT	7	120	80	$0.4396 \times 10^{-3}$	$0.7512 \times 10^{-3}$	1.2200	3	1.6
	First order derivative	11	80	60	$0.4549 \times 10^{-3}$	$0.7200 \times 10^{-3}$	1.2487	6	3.2
	Second order derivative	9	100	70	$0.5016 \times 10^{-3}$	$0.7669 \times 10^{-3}$	1.1794	3	2.0

## 4 结 论

以药食同源真菌安络小皮伞发酵菌丝体的三种活性成分为研究对象,在筛选特征波长、预处理方法、隐含层节点数和扩展常数的基础上,采用 RBFNN 结合 NIRS 建立安络小皮伞菌丝体中甘露醇、多糖和腺苷组分定量分析模型,其预测能力分别达到 90.09%、93.54% 和 88.47%。

结果表明利用近红外光谱技术结合现代化学计量学,可以快速、准确、无损地对安络小皮伞菌株中

的有效成分进行定量分析,其预测精度能够满足实际应用中的质量控制。该方法为大型真菌的质量监控及有效成分快速测定提供了新的思路。

## 参 考 文 献

- Chen Xiguang, Zhang Yishen, Li Runqiu, et al.. Study on water soluble polysaccharide from *Marasmius androsaceus* [J]. Acta Mycologica Sinica, 1990, 9(2): 155-160.  
陈西广, 张翼伸, 李润秋, 等. 安络小皮伞中水溶性多糖的研究 [J]. 真菌学报, 1990, 9(2): 155-160.
- Zhou Tingting, Jiang Xiangzhi, Wang Ying, et al.. Study on characteristic spectrum of the extract of *Marasmius androsaceus*

- [J]. *China Pharmacist*, 2013, 16(3): 325–328.
- 周婷婷, 姜翔之, 王 颖, 等. 安络小皮伞提取物特征图谱研究 [J]. *中国药师*, 2013, 16(3): 325–328.
- 3 梁启明, 徐 扬, 王艳珍, 等. 安络小皮伞菌丝体多糖的提取及其抗脂质过氧化作用的研究 [J]. *食品工业科技*, 2007, 28(9): 127–129.
- 4 L Zhang, M Yang, Y Song, *et al.*. Anti hypertensive effect of 3, 3,5,5-tetramethyl-4-piperidone, a new compound extracted from *Marasmius androsaceus* [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2009, 123(1): 34–39.
- 5 Zhao Jiewen, Bi Xiakun, Lin Hao, *et al.*. Visible-near-infrared transmission spectra for rapid analysis of the freshness of eggs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 053003.
- 赵杰文, 毕夏坤, 林 颖, 等. 鸡蛋新鲜度的可见-近红外透射光谱快速识别 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 053003.
- 6 Wu Chunyang, Lu Qipeng, Ding Haiquan, *et al.*. Noninvasive blood glucose sensing with near-infrared spectroscopy based on interstitial fluid [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1117001.
- 吴春阳, 卢启鹏, 丁海泉, 等. 利用人体组织液进行近红外无创血糖测量 [J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1117001.
- 7 Zhang Yibo, He Huan, Meng Qingfan, *et al.*. Application of near infrared reflectance spectroscopy-radial basis function neural network for non-destructive determination of *Coriolus Versicolor* [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3552–3557.
- 张益波, 何 欢, 孟庆繁, 等. 近红外光谱结合径向基神经网络在云芝菌丝体无损分析中的应用 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3552–3557.
- 8 J Moody, C Darken. Fast learning in network of locally-tuned processing units [J]. *Neural Computation*, 1989, 2(2): 281–284.
- 9 Liu Yin, Fu Guangwei, Zhang Yanjun, *et al.*. A novel method for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems based on radial basis function neural networks to extract features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0206002.
- 刘 银, 付广伟, 张燕君, 等. 基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0206002.
- 10 C-N Ko. Reinforcement radial basis function neural networks with an adaptive annealing learning algorithm [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2013, 221: 503–513.
- 11 Guo Weiliang, Zhang Zhuoyong, Lu Jiahui, *et al.*. Application of near infrared spectroscopy in screening *Cordyceps militaris* mutation strains and optimizing their fermentation process [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2077–2082.
- 郭伟良, 张卓勇, 逯家辉, 等. 近红外光谱法在蛹虫草诱变筛选及其发酵条件优化中应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2077–2082.
- 12 Guo Weiliang, Wang Dan, Song Jia, *et al.*. Simultaneous and rapid quantitative analysis of four components in *Cordyceps militaris* mycelium powder using near infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0230002.
- 郭伟良, 王 丹, 宋 佳, 等. 近红外光谱法同时快速定量分析蛹虫草菌丝体中 4 种有效成分 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0230002.
- 13 Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China, Part I [M]. Beijing: Chinese Medical Science and Technology Press, 2010. 106.
- 中华人民共和国药典委员会. 中华人民共和国药典, 第一部 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010. 106.
- 14 Wang Liming, Xia Wenshui. Determination of TPS by improvement of anthrone-sulfuric acid method [J]. *Food Science*, 2005, 26(7): 185–188.
- 王黎明, 夏文水. 蒽酮-硫酸法测定茶多糖含量的研究 [J]. *食品科学*, 2005, 26(7): 185–188.
- 15 Cai Youhua, Fan Wenxia, Liu Xueming, *et al.*. Determination of cordycepic acid content in the mycelia of *Cordyceps brasiliensis* Henn by colorimetry [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2008, 24(1): 76–79.
- 蔡友华, 范文霞, 刘学铭, 等. 比色法测定巴西虫草菌丝体中虫草酸的含量 [J]. *现代食品科技*, 2008, 24(1): 76–79.
- 16 W L Guo, Y P Du, Y C Zhou, *et al.*. At-line monitoring of key parameters of nisin fermentation by near infrared spectroscopy, chemometric modeling and model improvement [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2012, 28(3): 993–1002.
- 17 Gao Jing, Lu Qipeng, Peng Zhongqi, *et al.*. Parameter design and optimization of collecting light ellipsoidal reflector in near infrared noninvasive biochemical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0822007.
- 高 静, 卢启鹏, 彭忠琦, 等. 近红外无创生化分析中集光椭球反射镜参数设计与优化 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0822007.

栏目编辑: 吴秀娟