

基于连续偏振光谱技术与嵌入型灰色神经网络的 稻种发芽率检测方法研究

程宇琼¹ 卢伟^{1,2*} 罗慧¹ 洪德林³ 党晓景³

¹南京农业大学工学院江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 江苏 南京 210031

²远程测控技术江苏省重点实验室, 江苏 南京 210096

³南京农业大学农学院/作物遗传与种质创新国家重点实验室, 江苏 南京 210095

摘要 针对稻种发芽率传统检测方法周期长, 近红外光谱检测技术等无损检测方法受稻种自然颜色及含水量影响大的问题, 通过连续偏振光谱结合嵌入型灰色神经网络(IGNN)的方法建立稻种发芽率预测模型。对检测连续偏振光谱运用经典模式分解(EMD)和小波包变换进行去噪处理, 根据去噪效果选择EMD去噪。利用主成分分析(PCA)提取去噪后的连续偏振光谱特征, 结合偏最小二乘法回归(PLSR)、反向传播神经网络(BPNN)、径向基神经网络(RBFNN)和IGNN分别构建稻种发芽率预测模型, 建模结果显示10 min检测时间点IGNN预测模型精度最高, 预测集相关系数 $R_p=0.985$, 预测集均方根误差(RMSEP)为0.771。研究结果表明基于连续偏振光谱技术结合嵌入型灰色神经网络的方法实现稻种发芽率快速无损检测是可行的且精度较高。

关键词 光谱学; 连续偏振光谱技术; 灰色神经网络; 稻种; 发芽率

中图分类号 S511 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1230001

Study on Prediction of Rice Seed Germination Rate by Using Continuous Polarization Spectroscopy and Inlaid Grey Neural Network

Cheng Yuqiong¹ Lu Wei^{1,2} Luo Hui¹ Hong Delin³ Dang Xiaojing³

¹Jiangsu Provincial Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment Engineering, College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210031, China

²Jiangsu Provincial Key Laboratory of Remote Measurement & Control Technology, Nanjing, Jiangsu 210096, China

³State Key Laboratory of Crop Genetics & Germplasm Enhancement, College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract With respect to the shortcomings of traditional rice seed germination rate detection such as more time consumption, and the problems of near infrared spectroscopy that it is easily influenced by natural color and water content of rice seeds, a method based on continuous polarization spectroscopy and inlaid grey neural network to achieve rapid and nondestructive prediction of rice seed germination rate is proposed. The obtained continuous polarization spectra are de-noised by the empirical mode decomposition (EMD) and wavelet packet transform, and EMD is selected according to the de-noising effect. The characteristics of de-noised continuous polarization spectra are extracted by the principal component analysis (PCA) and four modeling methods are used to build rice seed germination rate prediction models including partial least squares regression (PLSR), back propagation neural network (BPNN), radial basis function neural network (RBFNN) and inlaid grey neural network (IGNN). The modeling results show that the IGNN model at 10 min testing time is the most accurate, with the correlation coefficient of prediction set as 0.985 and mean square error of prediction set as 0.771. The research results show

收稿日期: 2015-06-11; 收到修改稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61401215)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20130696)、中央高校基本科研业务经费项目(KYZ201427)、远程测控技术江苏省重点实验室开放基金(YCCK201501)

作者简介: 程宇琼(1994—), 女, 本科生, 主要从事农产品无损检测技术方面的研究。E-mail: chengyuqiong_njau@163.com

*通信联系人。E-mail: njaurobot@njau.edu.cn

that the method based on continuous polarization spectroscopy and inlaid grey neural network can achieve rapid and nondestructive prediction of rice seed germination rate and has high prediction accuracy.

Key words spectroscopy; continuous polarization spectroscopy technique; inlaid grey neural network; rice seed; germination rate

OCIS codes 300.6170; 100.4145; 070.4790

1 引 言

我国水稻种植面积已达4.5亿,稳定的产量是人民生活的基本保障,因此稻种质量检验对我国粮食安全和社会稳定发展具有重要意义。其中发芽率是水稻产量的决定性前提,作为重要指标广泛应用于稻种质量检验领域^[1]。目前国内外稻种发芽率检测方法可分为有损检测和无损检测。有损检测以发芽实验法为主,发芽实验法^[2]测定精度较高,但其实验过程需按照农作物种子发芽技术规程进行,要求严苛,且实验周期长。无损检测以近红外光谱技术和高光谱成像技术为主,近红外光谱技术检测过程快捷方便,通过近红外反射光谱检测稻种表面及内部物质信息进而鉴定发芽率,但其检测模型由于不同品种稻种自然颜色差异普适性较差;高光谱成像技术^[3]将图像技术和光谱信息相结合鉴定稻种发芽率,预测判别率可达100%,为稻种发芽率快速无损检测提供了一条新的途径,但该技术无法准确获取稻种内部同发芽率密切相关的生命信息,原理可靠性有待提高。偏振光谱技术基于光反射和透射偏振特性进而反演目标本征特性,由激光偏振光谱^[4]、独立波段偏振光谱^[5]逐步发展为连续波段偏振光谱^[6],应用范围已扩展到多个先进领域^[7-10]。

近年来研究人员将灰色系统和人工神经网络相结合构成灰色神经网络并在众多领域取得一定成果。杨简等^[11]在基于灰色神经网络的蛋品新鲜度无损检测研究中证实灰色神经网络同反向传播神经网络(BPNN)模型分级相比正确率提高了3.8%。郭兰兰等^[12]在基于灰色神经网络模型的水质预测应用研究中表明灰色神经网络较灰色模型GM(1,1)和神经网络模型预测性能最优。陈淑燕等^[13]在交通量的灰色神经网络预测方法研究中将灰色神经网络分为串联型(PGNN)、并联型(SGNN)和嵌入型(IGNN),并通过实时交通量预测判别精度,研究表明3种灰色神经网络模型预测精度均优于单一模型,其中IGNN模型预测较PGNN和SGNN收敛速度更快,性能最优。

为提高稻种发芽率预测精度,本文提出连续偏振光谱技术结合嵌入型灰色神经网络方法检测稻种发芽率,通过连续偏振光谱技术构建连续偏振光谱检测稻种膜结构完整性和内部生化变化,进而建立IGNN预测模型鉴定稻种发芽率,该方法同近红外光谱和高光谱成像技术相比普适性、原理可靠性得到了提高。

2 材料与方 法

2.1 实验材料与设备

以形态饱满、无霉变为选择标准从收获的南粳46稻种中随机挑选800粒存放在保鲜袋中,冷藏于4℃冰箱。材料制备使用的南粳46稻种由南京农业大学农学院提供,人工老化和发芽实验使用的智能人工气候箱购自宁波江南仪器厂,型号为RXZ型。

2.2 人工老化处理

为获得4种不同老化程度的稻种,分别在4个洁净烧杯内随机放置200粒稻种并依次标记a、b、c、d,利用智能人工气候箱(相对湿度为100%、温度为45℃)对a、b、c、d4组稻种进行人工老化,老化时间依次为0、2、4、6d。老化后暴晒72h,将4组稻种分别放入塑料密封袋并做好标记,置于4℃冰箱冷藏。

2.3 实验原理

连续偏振光谱技术基于不同老化程度稻种浸出液透射椭圆偏振光差异和不同物质偏振敏感波长差异,利用椭圆偏振光矢量轨迹方程表征偏振特性。椭圆偏振光矢量表达式为

$$\mathbf{E}(z,t) = x_0 \sum_{i=1}^n E_{x_i} + y_0 \sum_{i=1}^n E_{y_i}, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{x_i}}{a_i}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{y_i}}{b_i}\right)^2 - \sum_{i=1}^n 2\left(\frac{E_{x_i}}{a_i}\right)\left(\frac{E_{y_i}}{b_i}\right)\cos\delta_i = \sum_{i=1}^n \sin\delta_i, \quad (2)$$

根据(1)式和(2)式,椭圆偏振光矢量轨迹方程能够在连续偏振角下表征偏振特性,提供更多同稻种发芽率检测密切相关的偏振信息。因此,连续偏振光谱技术与近红外光谱等分析技术相较,通过偏振信息能够更加全面地反演不同老化程度稻种的物理、生化特性差异,在特定方向的偏振光谱透射率对稻种生命信息更加敏感。

2.4 实验步骤

实验使用USB4000型光纤光谱仪(Ocean Optics,波长为200~1100 nm)采集光谱,以卤素灯(上海闻奕公司,功率为10 W,波长为350~2500 nm)作为光源,两个偏振片分别作为起偏器和检偏器调制检测线偏振光,考虑到检测瓶本身对光的吸收散射影响,选择表面平滑的无色透明玻璃瓶(容量为25 mL,高度为9 cm,宽度为2 cm)。调整输出光纤头、起偏器中心、检偏器中心和接收光纤头处于同一直线,且光路垂直于检测瓶表面。通过反复实验给出测量系统的最优位置:输出光纤头和接收光纤头之间水平距离为12 cm,起偏器和检偏器之间水平距离为8 cm,输出光纤头与起偏器间水平距离以及检偏器与接收光纤头之间水平距离均为2 cm,检测瓶置于起偏器和检偏器中间。

将a、b、c、d 4组老化稻种分别进行连续偏振光谱采集,实验样本容量为10粒。为避免混淆,实验前将每份稻种样本置于标有相应组号和实验编号的洁净玻璃烧杯(30 mL)中备用。实验过程中为减小实验误差选用同一洁净检测瓶,以检测瓶平滑表面、起偏器和检测器保持平行作为标准固定检测瓶位置,并向检测瓶中注入15 mL清水后打开卤素灯和光纤光谱仪,待实验装置光谱显示稳定后将其保存用于后续检测光谱的归一化,而后将其中一份稻种样本装入瓶中,使用洁净的玻璃棒搅拌后分别在1、5、10 min检测时间点检测0°~90°连续偏振角下的偏振光谱,为便于操作,通过旋转检偏器对每份稻种样本共采集3×19条光谱,旋转角为5°。a、b、c、d组稻种经过实验共采集3×4×20×19条光谱。

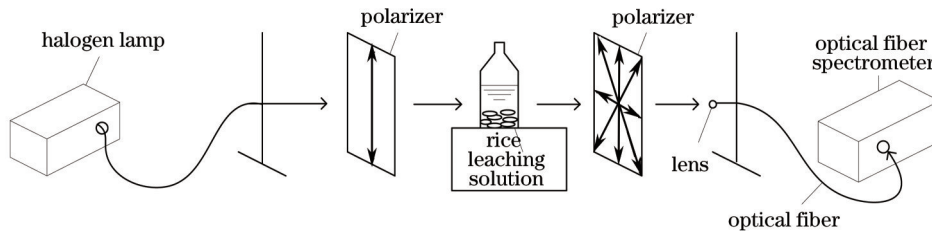


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

2.5 发芽实验

利用发芽实验测定采集光谱后老化稻种的发芽率梯度,将a、b、c、d组稻种共800粒分别置于清水中浸种2 d,而后在玻璃培养皿(内铺两层滤纸)上按组号顺序划分相应位置,并按一定间距依次放置老化稻种。加水湿润后密封置于智能人工气候箱中,将温度设置为25℃,根据GB/T 3543.1~3543.7-1995发芽技术规程^[14]要求培养。两周后得出不同老化天数稻种发芽率如表1所示。

表1 不同老化天数稻种发芽率

Table 1 Germination rate of rice seeds with different aging time

Aging time /d	Germination rate /%	Number of calibration set	Number of prediction set
0	88.0 ± 3.5	120	80
2	84.3 ± 2.2	120	80
4	77.7 ± 3.3	120	80
6	68.3 ± 3.0	120	80

3 结果与分析

3.1 连续偏振光谱构造

基于不同老化程度稻种浸出液在吸收散射光过程中的偏振特性差异进行稻种发芽率检测,采用归一化和偏振敏感波段选取的方法完成3×4×20×19条偏振光谱的预处理并截去受噪声影响大的波段。考虑到不同物质的偏振敏感波段差异,选择偏振信息丰富的波段构造连续偏振光谱。

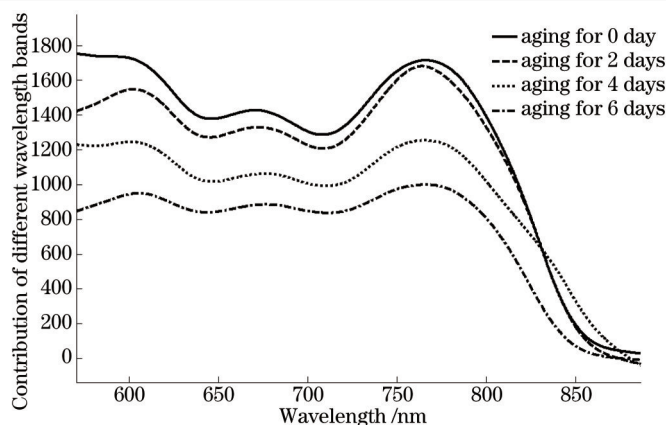


图2 波段偏振差异贡献图

Fig.2 Contribution map of different wavelength bands to polarization

经计算各波段在连续偏振角下透射率差异贡献如图2所示,老化0、2、4、6 d 稻种的波段偏振贡献值呈现一致的变化趋势,573~801 nm 波段附近贡献值较高且变化平缓,801 nm 波段附近开始迅速下降到零,因此稻种偏振敏感波段为 573~801 nm。考虑到此波段内 35°~90°偏振角对应光谱数据几乎为零,组合 0°~30°偏振角相应偏振敏感波段光谱构造稻种连续偏振光谱。对稻种连续偏振光谱分别运用经典模式分解(EMD)和小波包进行去噪处理,根据去噪效果选择去噪方式。

3.1.1 EMD 去噪

EMD 以本身的局部特征时间尺度为基准对信号能量进行分解,得到有限的本征模态函数(IMF),具有很高的频率分辨率和很好的自适应性^[15]。基于上述原理将连续偏振光谱不断迭代分解并筛选出满足条件的本征模态函数^[16],每一轮筛选过程都会分离出一个 IMF,然后将余量继续执行筛选操作,共得到 9 阶 IMF 分量和一个残余项,然后自适应地选出分界点进行抑制和重构。

3.1.2 小波包去噪

小波包变换基于时间和频域的局部变换,同小波变换相比,处理信号时同时对高低频部分进行分解,能够实现信号有用信息的有效提取。

$$\begin{cases} d_j^{2n}(k) = \sum_l h_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \\ d_j^{2n+1}(k) = \sum_l g_{l-2k} d_{j+1}^n[l] \end{cases}, \quad (3)$$

$$d_{j+1}^n(k) = \sum_l h_{k-2l} d_j^{2n}[l] + \sum_l g_{k-2l} d_j^{2n+1}[l]. \quad (4)$$

小波包变换过程如(3)式和(4)式所示, d_j^{2n} , $d_j^{2n+1}(k)$ 分别为一个逼近函数 $f(t)$ 在尺度 2^j 下于子空间 U_j^{2n} 和 U_j^{2n+1} 上的投影^[17]。基于上述原理,对原始连续偏振光谱进行小波包分解,将分解所得高频系数阈值量化后重构信号完成去噪处理。考虑到小波包基的选择将直接影响信号的去噪效果^[18],初步选取 Daubechies 小波系的 db2, db3, ..., db10 小波包基和 Symlets 小波系 sym2, sym3, ..., sym8 小波包基分别对连续偏振光谱进行小波包变换^[19],并以均方根误差(RMSE)为指标选择重构能力最强的小波包基。均方根误差公式为

$$f_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N [x_r(n) - x(n)]^2 / N}, \quad (5)$$

式中 $x(n)$ 为原始信号, $x_r(n)$ 为重构信号, N 为信号长度。各小波包基重构信号和原始信号的均方根误差如图3所示。

由图3可知 sym2 小波包基信号重构 RMSE 值最低,重构能力最强。因此选择 sym2 小波包基为稻种连续偏振光谱信号小波包分析的最佳小波包基,并对信号进行 3 层分解。去噪过程中阈值的选取非常重要,采用 Stein 无偏风险估计阈值准则,根据 $T = \sqrt{2 \ln n \log_2 n}$ (n 为信号长度)设置阈值 $T=4.749$,设置软阈值方法对信号去噪。

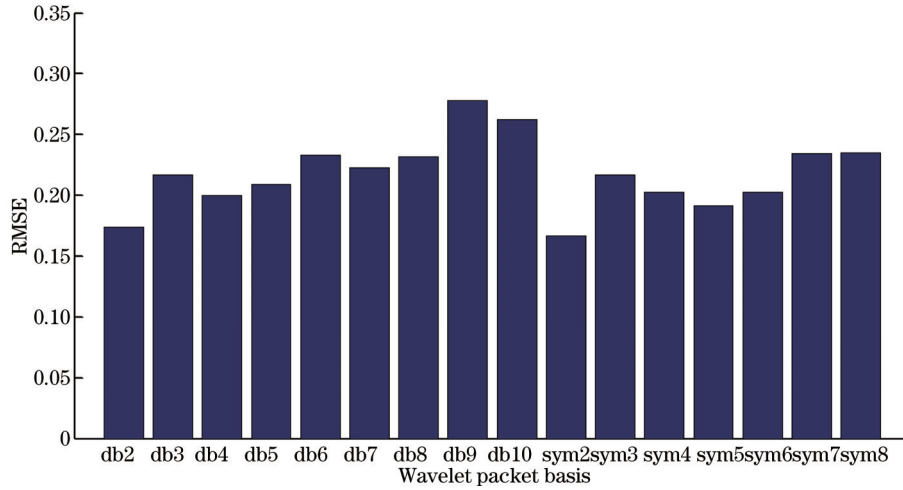


图3 信号重构 RMSE 直方图

Fig.3 Signal reconstruction RMSE histogram

3.1.3 去噪效果对比

选择均方根误差和信噪比(SNR)为评估指标定量分析 EMD 和小波包去噪效果,信噪比计算公式为

$$R_{SN} = 10 \times \lg \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N x^2(n)}{\sum_{n=1}^N [x(n) - x_r(n)]^2} \right\} . \quad (6)$$

经过计算,EMD 去噪的 RMSE 和 SNR 分别为 0.960 和 36.6 dB,小波包变换去噪的 RMSE 和 SNR 分别为 1.54 和 32.5 dB。相较小波包去噪,EMD 去噪得到的 RMSE 值较小,SNR 值更高,能够更多地保留原连续偏振光谱特性,去噪效果更好,因此选择 EMD 去噪方法。去噪后连续偏振光谱如图 4 所示(构造连续偏振光谱时以偏振角划分横坐标后再以波长细分)。

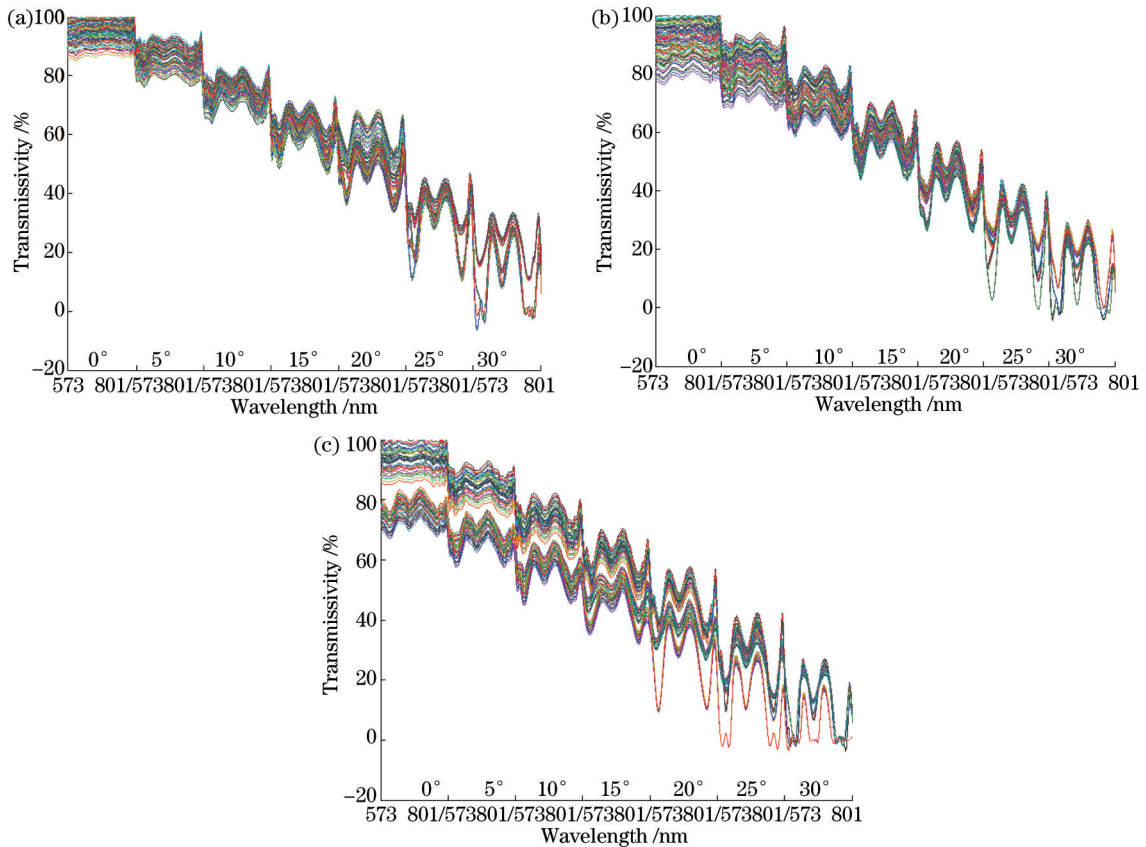


图4 各检测时间点连续偏振光谱。(a) 1 min;(b) 5 min;(c) 10 min

Fig.4 Continuous polarization spectra at different prediction time. (a) 1 min; (b) 5 min; (c) 10 min

由图4得知,由于稻种浸出液中丙二醛(MDA)生色团的碳氧双键 π 电子从成键 π 轨道向反键 π^* 轨道转移时吸收 603 nm 附近波段能量且吸收强度与稻种浸出液中 MDA 浓度及稻种老化程度呈正相关,各检测时间点稻种透射连续偏振光谱在 603 nm 处呈现较明显的吸收峰且吸收峰值同老化程度呈正相关。由于 MDA 生色团的非键 n 电子从非键 n 轨道向反键 π^* 轨道转移时吸收 679 nm 附近波段能量,679 nm 处有微弱吸收峰;由于助色团能够减小 MDA 生色团中碳氧双键 π 电子从 π 向 π^* 轨道跃迁的能级差,772 nm 处有较明显的吸收峰且其吸收峰值同老化程度呈正相关。由于稻种细胞膜通透性同稻种老化程度呈正相关,稻种浸泡时间越长,不同老化程度稻种的连续偏振光谱差异越明显。

3.2 连续偏振光谱特征提取

经过预处理之后每条稻种连续偏振光谱有 6160 个数据点,各检测时间点稻种连续偏振光谱组成大小为 80×6160 的数据矩阵。虽然所有数据都可作为模型的输入,但大量数据存在信息冗余,会为模型带来巨大的计算量。以 99% 为目标累积贡献率,利用主成分分析(PCA)^[20]分别选取各检测时间点数据矩阵的主成分组成特征向量,实现数据降维的同时保留原数据的主要信息且互不相关,较原连续偏振光谱数据具有更好的性质。1 min 和 5 min 检测时间点连续偏振光谱选取前 4 个主成分组成特征向量,10 min 检测时间点连续偏振光谱选取前 2 个主成分组成特征向量。

3.3 预测模型建立与验证

运用偏最小二乘法回归(PLSR)、BP 神经网络(BPNN)、径向基神经网络(RBFNN)和 IGNN 4 种建模方法在 3 个检测时间点共建立 12 种稻种发芽率预测模型。各检测时间点以 3:2 为比例随机选出校正集(48 组)和预测集(32 组)作为模型输入,将稻种发芽率作为模型输出。

PLSR 将原始光谱数据通过线性组合提取新的主成分,并对其进行多元线性回归,建模结果易于解释^[21]。BPNN 作为一种前馈分层网络结构,具有较强的非线性逼近能力和自适应学习能力,广泛应用于非线性系统的模型建立^[22]。RBFNN 作为一种高效前馈式神经网络可以处理系统内在难以解析的规律,性能优于一般神经网络。灰色神经网络模型通过有效途径将灰色系统方法与神经网络方法有机结合起来,能够对复杂、不确定的问题进行求解^[23]。已有研究表明^[13]IGNN 模型在提高预测精度的同时加快神经网络收敛,性能最优。由于文中不同老化程度稻种偏振特性规律的复杂性,选择 IGNN 模型进行稻种发芽率预测。

IGNN 在一般神经网络的基础上增加一个灰化层和白化层^[11],首先利用灰化层将连续偏振光谱信号 $x_n(t)$ 进行累加得到数据序列 $y_n(t)$:

$$y_n(t) = \sum_{i=1}^{48} x_n(t) , \quad (7)$$

式中 t 为训练网络输入样本组编号, $t=1,2,\dots,48$; n 为稻种连续偏振光谱特征个数,1 min 和 5 min 检测时间点 $n=1,2$,10 min 检测时间点 $n=1,2,3,4$ 。

建立各检测时间点灰色神经网络的微分方程:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} + ay_1(t) = \sum_{i=2}^n b_i y_i(t) , \quad (8)$$

将(8)式离散化,建立各检测时间点预测公式:

$$\hat{y}_1(t) = \left[y_1(1) - \sum_{i=2}^n \frac{b_i}{a} y_i(t) \right] \exp(-at) + \sum_{i=2}^n \frac{b_i}{a} y_i(t) , \quad (9)$$

设 $z = \sum_{i=2}^n \frac{b_i}{a} y_i(t)$, 代入(9)式中得到各检测时间点的 IGNN 网络结构为 4 层:

$$\begin{aligned} \hat{y}_1(t) &= \left\{ [y_1(1) - z] - \frac{y_1(1)}{1 + \exp(-at)} + \frac{2z}{1 + \exp(-at)} \right\} [1 + \exp(-at)] \\ &= \left[\frac{2z}{1 + \exp(-at)} - y_1 \frac{y_1(1)}{1 + \exp(-at)} \right] [1 + \exp(-at)] - [z - y_1(1)] [1 + \exp(-at)] \end{aligned} \quad (10)$$

采用校正集相关系数 R_c 、校正集均方根误差 RMSEC、预测集相关系数 R_p 、预测集均方根误差 RMSEP 4 个评估指标评价各检测时间点稻种发芽率预测模型精度,计算结果如表 2 所示,预测效果如图 5 所示。由图表

可知各检测时间点 IGNN 模型预测精度最高,且预测精度同检测时间成正比。

表2 不同建模方法的预测精度

Table 2 Prediction accuracy of different models

Prediction time /min	Modeling methods	Calibration set		Prediction set	
		R_c	RMSEC	R_p	RMSEP
1	PLSR	0.743	6.205	0.721	6.145
	BPNN	0.834	3.985	0.831	3.982
	RBFNN	0.853	3.986	0.871	3.726
	IGNN	0.895	3.547	0.902	3.439
5	PLSR	0.943	2.712	0.931	2.532
	BPNN	0.949	2.411	0.953	2.418
	RBFNN	0.963	1.783	0.969	1.784
	IGNN	0.970	1.208	0.979	1.206
10	PLSR	0.959	1.315	0.954	1.532
	BPNN	0.963	1.423	0.969	1.245
	RBFNN	0.975	0.901	0.979	0.893
	IGNN	0.983	0.773	0.985	0.771

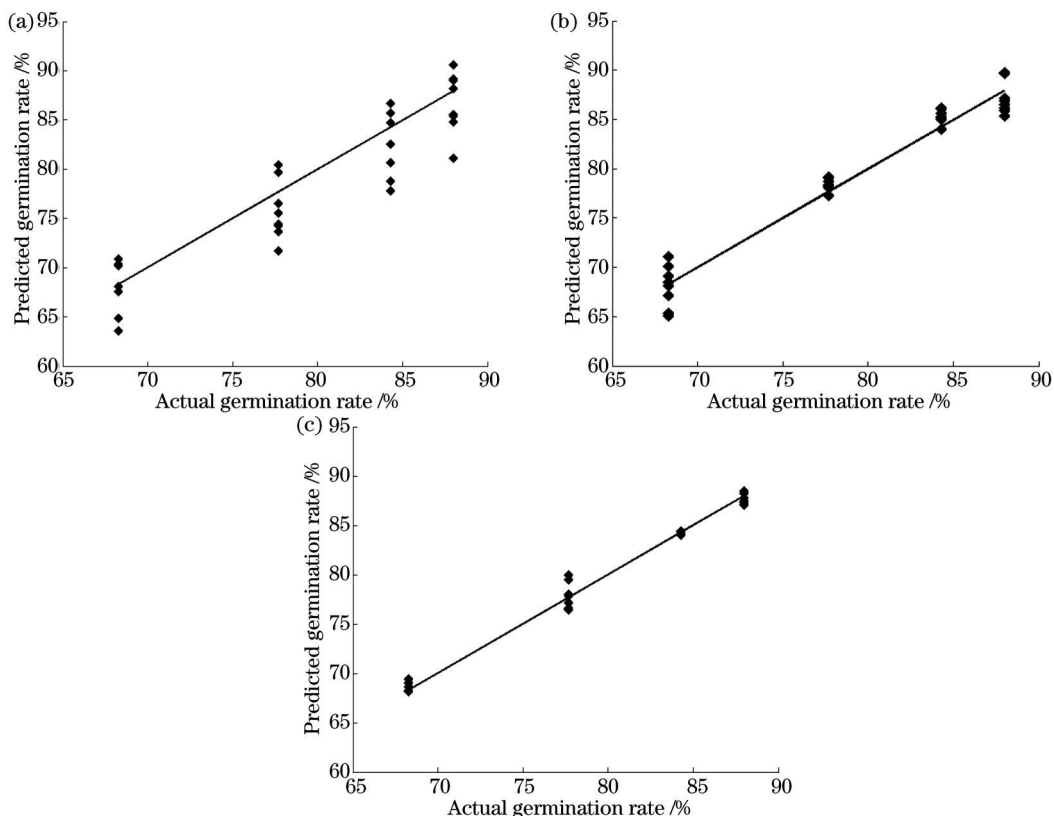


图5 各检测时间点的 IGNN 模型预测效果。(a) 1 min; (b) 5 min; (c) 10 min

Fig.5 Performance of IGNN prediction model at different time. (a) 1 min; (b) 5 min; (c) 10 min

4 讨论与结论

已有生化研究表明,稻种发芽率与其浸出液中可溶性糖和MDA含量呈显著的负相关,其中可溶性糖作为光学活性物质,其浓度与旋光度同稻种浸出液椭圆偏振特性密切相关。基于不同老化程度稻种浸出液中可溶性糖和丙二醛浓度不同的生物学依据及偏振光检测的物理学依据,通过连续偏振光谱表征稻种浸出液椭圆偏振特性,进而反演稻种内部生命信息。

选取检测时间点为 1、5、10 min,同电导率法^[24]相比较速度得到提高。运用 EMD 和小波包变换对各检测时间点获取的连续偏振光谱进行去噪处理,结果表明 EMD 去噪效果更好。分别选用 PLSR、BPNN、RBFNN 和 IGNN 等建模方法建立稻种发芽率检测模型,在不同检测时间点 IGNN 模型的预测精度均为最高。建模结果显示 IGNN 模型预测精度与检测时间呈正相关,10 min 检测时间点 IGNN 模型稻种发芽率预测精度最高。研究表明通过连续偏振光谱结合嵌入型灰色神经网络的方法建立稻种发芽率预测模型是可行的,且预测精度较高。

参 考 文 献

- 1 Li Yinian, Jiang Dan, Liu Yingying, *et al.*. Testing of germination rate of hybrid rice seeds based on near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1528–1532.
李毅念,姜丹,刘缨瑛,等.基于近红外光谱的杂交水稻种子发芽率测试研究[J].*光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1528–1532.
- 2 Zhang Huaxian. Detection Method of Rice Seed Vigor, Life Viability and Computer Vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
章华仙.水稻种子活力、生活力检测方法 & 计算机视觉的应用研究[D].杭州:浙江大学, 2007.
- 3 Li Meiling, Deng Fei, Liu Ying, *et al.*. Study on detection technology of rice seed vigor based on hyperspectral image[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(1): 1–6.
李美凌,邓飞,刘颖,等.基于高光谱图像的水稻种子活力检测技术研究[J].*浙江农业学报*, 2015, 27(1): 1–6.
- 4 Tang Yanfu, Nie Zhenwei. Study on periodic ripples on metallic surfaces induced by polarized lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0702002.
唐延甫,聂真威.偏振激光诱导金属表面周期条纹结构机理的研究[J].*中国激光*, 2015, 42(7): 0702002.
- 5 Wang Feng, Yang Jinhong, Li Xiaoming, *et al.*. oil spill visible/near-infrared polarization light detection method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051202.
王峰,杨锦宏,李小明,等.水面溢油可见/近红外偏振光检测方法研究[J].*激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051202.
- 6 Lee D W, Seo K W, Min B R, *et al.*. Discrimination between cancer and normal tissue using near infrared spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2007, 8(2): 1341–1344.
- 7 Hooper B A, Baxter B, Piotrowski C, *et al.*. An airborne imaging multispectral polarimeter (AROSS-MSP)[C]. *Oceans 2009*, 2009.
- 8 Ahmed S, Gilerson A, Oo M, *et al.*. The polarization properties of reflectance from coastal waters and the ocean-atmosphere system[C]. *SPIE*, 2006, 6360: 636003.
- 9 Lee R L, Samudio O R. Spectral polarization of clear and hazy coastal skies[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7499–7508.
- 10 Gurjar R S, Bachman V, Perelman L T, *et al.*. Imaging human epithelial properties with polarized light scattering spectroscopy[J]. *Nature Medicine*, 2001, 7(11): 1245–1248.
- 11 Yang Jian, Pan He, Li Taihao, *et al.*. Study on non-destructive detection method for fresh degree of eggs based on grey neural network [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(1): 229–234.
杨简,潘贺,李太浩,等.基于灰色神经网络的蛋品新鲜度无损检测的研究[J].*中国农机化学报*, 2014, 35(1): 229–234.
- 12 Guo Lanlan, Zhou Zhihong, An Yan. Study on grey model combined with artificial neural networks model for water quality forecast[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015, 45(5): 89–93.
郭兰兰,邹志红,安岩.基于灰色神经网络模型的水质预测应用研究[J].*数学的实践与认识*, 2015, 45(5): 89–93.
- 13 Chen Shuyan, Wang Wei. Grey neural network forecasting for traffic flow[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2004, 34(4): 541–544.
陈淑燕,王炜.交通量的灰色神经网络预测方法[J].*东南大学学报:自然科学版*, 2004, 34(4): 541–544.
- 14 National Standardization Technical Committee. GB/T3543.1~3543.7-1995 Rules for agricultural seed testing - Germination test[S]. Beijing: China Standard Press, 1995.
国家标准化技术委员会. GB/T3543.1~3543.7-1995 农作物种子检验规程——发芽试验[S].北京:中国标准出版社, 1995.
- 15 Wang Huanxue, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. An empirical mode decomposition algorithm based on cross validation and its application to lidar return signal de-noising[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1014001.
王欢雪,刘建国,张天舒,等.一种基于交叉认证和经验模态分解的滤波算法及其在激光雷达回波信号降噪处理中的应用[J].*中国激光*, 2014, 41(10): 1014001.
- 16 Mao Wei, Jin Ronghong, Geng Junping, *et al.*. A time-frequency analysis method for non-stationary signals based on improved Hilbert-Huang transform and its application[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2006, 40(5): 724–729.

- 毛 炜, 金荣洪, 耿军平, 等. 一种基于改进 Hilbert-Huang 变换的非平稳信号时频分析法及其应用[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(5): 724-729.
- 17 Mao Jiandong, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.*. Noise reduction in lidar signal based on wavelet packet analysis[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0209001.
- 毛建东, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 基于小波包分析的激光雷达信号消噪算法的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0209001.
- 18 Zhang Huahua. Research and application of signal enhancement algorithm based on the wavelet packet[J]. Electronic Test, 2010, (8): 15-20.
- 张花花. 基于最优小波包基的信号增强算法研究及应用[J]. 电子测试, 2010, (8): 15-20.
- 19 Gao Ke, Liu Jian, Liu Yujiao, *et al.*. Study on signal de-noising of shock wave pressure by gas explosion in confined space based on wavelet packet analysis[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(12): 17-22.
- 高 科, 刘 剑, 刘玉姣, 等. 受限空间瓦斯爆炸冲击波压力信号小波包去噪研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 17-22.
- 20 Weng Shizhuang, Zheng Shouguo, Li Pan, *et al.*. Quantitative analysis of fenitrothion based on surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0815001.
- 翁士状, 郑守国, 李 盼, 等. 基于表面增强拉曼光谱的杀螟硫磷定量分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0815001.
- 21 Liu Yanfang, Su Rongguo, Zhou Qianqian, *et al.*. Rapid modeling offshore eutrophication technique using optical parameters of CDOM [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1215001.
- 刘艳芳, 苏荣国, 周倩倩, 等. 基于 CDOM 光学参数的近海富营养化快速评价技术[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1215001.
- 22 Wang Chongchong, Hu Lifa, He Bin, *et al.*. Hysteresis compensation method of piezoelectric steering mirror based on neural network[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1113001.
- 王冲冲, 胡立发, 何 斌, 等. 基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1113001.
- 23 Wang Hanlin. The Establishment of the Grey Neural Network Model and Its Application on the Problem of Complex Nonlinear Prediction [D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- 王汉林. 灰色神经网络模型的建立及其在复杂非线性预测问题中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- 24 Liu Chunxiang, Sui Ming, Hu Pan, *et al.*. Analysis on seed vigor testing of Chinese cabbage based on UV absorbance method and electrical conductivity method[J]. Seed, 2013, 32(7): 18-21.
- 刘春香, 隋 铭, 胡 畔, 等. 紫外吸收法、电导率法检验大白菜种子活力的研究[J]. 种子, 2013, 32(7): 18-21.

栏目编辑: 吴秀娟