

# 基于特征光谱和GRNN的糙米发芽率快速检测方法研究

李欢欢<sup>1</sup> 卢伟<sup>1,2</sup> 洪德林<sup>3</sup> 党晓景<sup>3</sup> 梁琨<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>远程测控技术江苏省重点实验室, 江苏 南京 210096

<sup>3</sup>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** 针对种子发芽率检测常用方法操作复杂、周期长、受种子休眠期影响等问题,提出了一种基于特征光谱和广义回归神经网络(GRNN)的糙米发芽率快速检测方法。在温度为45℃、湿度为90%的条件下,对稻种进行高温高湿人工老化,老化时间为0、24、48、72、96、120、144、168 h;人工去壳处理后,采集近红外光谱数据,将160份糙米样品的光谱分为校正集(120份)和预测集(40份);采用标准正态变换(SNV)、一阶导数(FD)对光谱数据进行预处理,提取特征波长,分析不同建模方法和不同贡献率的特征波长对模型的影响。结果表明,以688、1146、1346、1366、1396、1686 nm对应的光谱作为输入,通过GRNN建立的模型最优,其校正集相关系数( $R_c$ )与标准偏差(SEC)分别为0.9743、1.9161,预测集相关系数( $R_p$ )与标准偏差(SEP)分别为0.9505、2.3423。研究表明,采用近红外光谱分析技术对糙米发芽率进行检测是可行的,能够从稻种生理学特性的角度揭示不同发芽率稻种的光谱差异,且所建模型在水稻发芽率预测方面有良好的预测能力,为便携式水稻发芽率光谱仪的研制提供了理论依据。

**关键词** 光谱学; 近红外光谱; 糙米; 发芽率; 预处理; 广义回归神经网络

中图分类号 S339.3+1;S511

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.113005

## Rapid Testing Method of Brown Rice Germination Rate Based on Characteristic Spectrum and General Regression Neural Network

Li Huanhuan<sup>1</sup> Lu Wei<sup>1,2</sup> Hong Delin<sup>3</sup> Dang Xiaojing<sup>3</sup> Liang Kun<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Jiangsu Provincial Key Laboratory of Remote Measurement and Control Technology, Nanjing, Jiangsu 210096, China

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

**Abstract** Considering that the current methods of germination rate detection are complex, time-consuming and affected by seed dormancy, a method for rapid detection of brown rice germination rate based on characteristic spectrum and general regression neural network (GRNN) is proposed. Under the condition of temperature 45 °C and relative humidity 90%, rice seeds are aged artificially for 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 h. Spectral data of 160 samples are collected by a near-infrared spectrometer after artificial shelled processing and divided into a calibration set (120 samples) and a prediction set (40 samples). Characteristic wavelengths are extracted after standard normalized variate (SNV) and first derivative (FD) preprocessing. The impact of different modeling methods and characteristic wavelengths on the model is analyzed. The experimental results show that the optimal model is constructed by GRNN

收稿日期: 2015-06-15; 收到修改稿日期: 2015-07-13; 网络出版日期: 2015-10-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(31401610)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20130696)、中共高校基本科研业务经费(KYZ201427)

作者简介: 李欢欢(1994—),男,本科生,主要从事农产品无损检测技术方面的研究。E-mail: hhljnau@126.com

导师简介: 卢伟(1978—),男,博士,副教授,主要从事农产品无损检测技术与农业机器人等方面的研究。

E-mail: njajrobot@njau.edu.cn(通信联系人)

with the spectral data of 688, 1146, 1346, 1366, 1396, 1686 nm. The correlation coefficients of the calibration set ( $R_c$ ) and the prediction set ( $R_p$ ) are 0.9743 and 0.9505, and the standard errors of the calibration set (SEC) and the prediction set (SEP) are 1.9161 and 2.3423. The research results show that it is feasible to measure the germination rate of brown rice seeds by using near infrared spectroscopy. The model has better predictive ability in germination rate, and reveals the difference between rice seeds with different germination rate from the perspective of physiological characteristics. This method provides a theoretical basis for the development of portable spectrometer for rice seed germination rate detection.

**Key words** spectroscopy; near infrared spectroscopy; brown rice; germination rate; preprocessing; general regression neural network

**OCIS codes** 300.6340; 040.3060; 300.6190

## 1 引言

我国是水稻生产大国,也是水稻消费强国,全国65%以上的人口以大米为主食,水稻成为我国最主要的粮食作物之一,水稻产量的波动会直接影响粮食供给总量,威胁到我国粮食安全<sup>[1]</sup>。因此,保证水稻的稳产、高产有着重要的社会意义。但由于种子的老化、裂变以及水稻品种差等因素,种子的发芽率低,对育种和水稻产量有严重影响。种子发芽率是衡量种子质量优劣的重要指标之一,对种子经营和农业生产有着极其重要的意义。目前水稻种子发芽率测定一般采用发芽实验法,这种方法不仅需要预处理,而且实验操作复杂、耗时长、对种子具有破坏性,无法实现发芽率的快速测定。为解决这一问题,需要找到一种快速检测水稻发芽率的方法<sup>[2]</sup>。

近红外光谱由物质吸收光能后使分子振动从基态向高能级跃迁时产生,受含氢基团(C—H, N—H, O—H)的倍频与和频的重叠主导,基团的吸收频谱表征了物质成分的化学结构<sup>[3]</sup>。近红外光谱技术是以化学成分为依据,对近红外区光谱的吸收特性进行的测定<sup>[4]</sup>,以其快速、简单、低成本、非破坏性和多组分同时测定等优点,广泛应用于农业、食品、生物、医学、材料等领域<sup>[5-7]</sup>。近红外光谱技术在种子质量检测方面的应用,国内外已有研究。梁剑等<sup>[8]</sup>通过研究单粒稻种的近红外漫反射光谱特征,并结合品种特有的光谱特性,对稻种进行分类鉴别;Rudolphi等<sup>[9]</sup>对红花种子油含量、油酸和亚油酸含量等进行建模,证明了近红外光谱适用于红花种子在育种方面的快速筛选;韩亮亮等<sup>[10]</sup>采用近红外光谱结合主成分-马氏距离模式识别方法鉴别了3种不同活力的燕麦种子,为快速、准确、无损测定种子活力提供了一条新途径。Agelet等<sup>[11]</sup>采用偏最小二乘判别分析(PLS-DA)、软独立模型分类分析(SIMCA)、K邻近方法(K-NN)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)分别对玉米种子进行建模,筛选损伤的玉米,最高识别率达99%;Xie等<sup>[12]</sup>利用近红外光谱分析法分析水稻蛋白质和直链淀粉含量,有利于早期育种程序中蛋白质和直链淀粉的估计。

本文以老化不同天数的糙米为材料,利用近红外光谱分析技术对糙米的发芽率进行分析,为近红外光谱在糙米发芽率检测方面的应用提供理论依据。为减小外界因素干扰对模型建立的影响,对光谱数据进行预处理,研究不同老化天数糙米之间的差异,通过特征提取和人工神经网络建立糙米发芽率的近红外预测模型,为稻种发芽率的快速检测提供有效方法。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验材料

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浦实验田2014年收获的南粳46,人工选取颗粒饱满、无霉变、大小形状基本相同的稻种2 kg,剔除夹杂物和杂种子。

### 2.2 水稻种子老化和去壳处理

将筛选的种子破休眠处理后分为8份,进行人工老化实验。将每组样品放置于玻璃托盘中,然后放入RXZ型(多段编程)智能人工气候箱(宁波江南仪器厂制造),在温度为45℃,湿度为90%的条件下,依次老化0、24、48、72、96、120、144、168 h,按时从智能气候箱中取出老化后的水稻种子,放置在阳光下晒干。对样品进行人工去壳处理,防止操作过程中人为的机械损伤。将获得的糙米按不同老化天数进行分类、编号,存储于密封袋中。

### 2.3 样品光谱数据测定

实验采用丹麦FOSS公司生产的InfraXact™近红外光谱仪,扫描波长范围为570~1848 nm,分辨率为

2 nm。开机预热 0.5 h 后,对仪器进行重新标定,以保证测量数据的准确性和可靠性。将老化不同天数的糙米样品分别放入样品杯中,排布均匀后进行光谱数据的采集。

## 2.4 发芽实验

实验参照 GB/T3543.4-1995<sup>[3]</sup>农作物种子检验规程发芽试验。每份材料取 100 粒放入 150 mL 烧杯,在 30 °C 恒温条件下,浸种 2 d。将材料放入内铺两层滤纸的玻璃培养皿中,滴入适量自来水,然后放入发芽箱,在日间 8 h、温度 30 °C 和夜间 16 h、温度 20 °C 条件下,进行置床发芽实验。统计实验样品发芽数,计算实验样品发芽率。

## 2.5 数据处理

将采集到的光谱数据利用马氏距离法剔除异常光谱样本数据,通过预处理和特征提取,得到糙米发芽率的特征光谱数据,分别通过主成分回归(PCR)、偏最小二乘法(PLS)、反向传播(BP)神经网络和广义回归神经网络(GRNN)建立糙米发芽率近红外预测模型。按 3:1 比例分为校正集和预测集,其中校正集 120 份,预测集 40 份。校正集用于模型的建立,预测集用于模型的验证与评估。用校正集来建立模型,模型的评价指标分别为校正集相关系数( $R_c$ )、标准偏差(SEC), $R_c$ 越大,SEC 越小,模型的性能越好。建立模型后,用预测集对模型进行验证和预测,验证集相关系数( $R_p$ )越大、标准偏差(SEP)越小,预测效果越好。

# 3 结果与分析

## 3.1 糙米发芽率和近红外吸收光谱

通过发芽实验得到不同人工老化时间糙米的发芽率数据,如表 1 所示,由表 1 可见,随着老化天数的增加,糙米的发芽率不断降低,说明种子在老化过程中体内发生一系列生理变化,导致发芽率降低<sup>[4]</sup>。

表 1 不同老化时间糙米的发芽率测定结果

Table 1 Germination rate of brown rice seeds with different aging time

Aging time/h	Germination rate/%	Number of calibration set	Number of prediction set
0	88.0	15	5
24	86.0	15	5
48	84.3	15	5
72	81.0	15	5
96	77.7	15	5
120	69.0	15	5
144	68.3	15	5
168	67.0	15	5

糙米的近红外吸收原始光谱如图 1 所示,不同老化天数的样品表现出十分相似的谱型,总趋势基本一致,相似度较强的吸收峰有 5 个;在 570~1100 nm 和 1400~1848 nm 波段光谱幅值波动较大,1100~1400 nm 波段光谱幅值波动较小;不同老化时间的样品吸收强度有较为明显的差异。

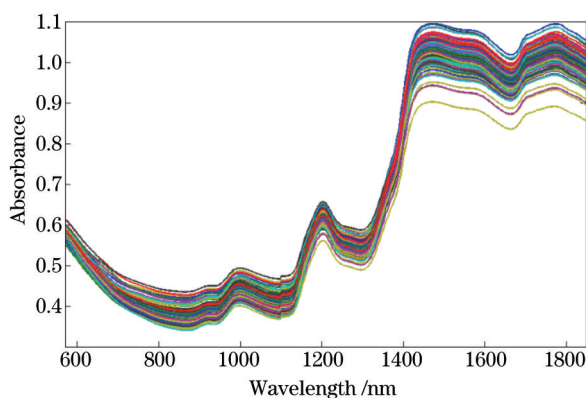


图 1 糙米原始光谱

Fig.1 Original absorption spectra of brown rice seeds

### 3.2 近红外光谱数据预处理

#### 3.2.1 奇异样品的剔除

预处理首先是超常样品的剔除,超常样品主要由实验条件变化、人工操作误差、仪器噪声等因素产生。剔除模型中的异常样品,可以优化数学模型,提高所建模型的预测性能。实验采用马氏距离法<sup>[15]</sup>进行奇异样本的剔除。

#### 3.2.2 散射校正和基线校正

分别采用标准正态变换(SNV)和一阶导数(FD)对原始光谱数据进行预处理。

由于样品中存在较多的散射介质,再加上样品状态、装样条件、仪器噪声、环境等因素的影响,导致散射现象发生,会对模型建立造成负面影响。采用SNV<sup>[16]</sup>对光谱进行预处理。结果如图2所示。

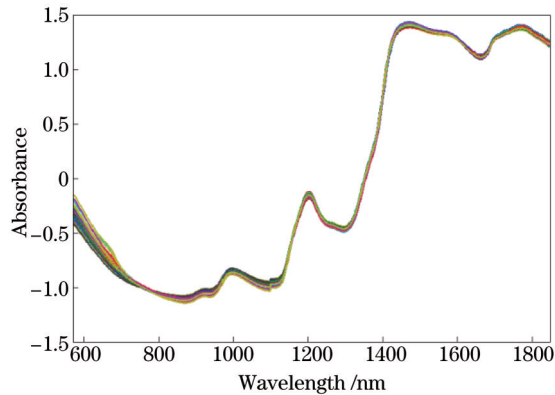


图2 糙米标准正态变换光谱

Fig.2 Absorption spectra of brown rice seeds preprocessed by SNV

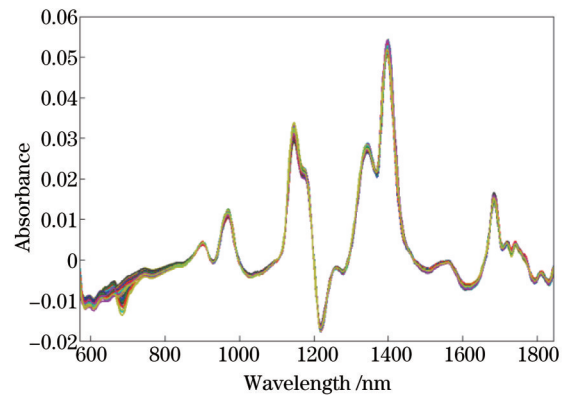


图3 糙米一阶导数光谱

Fig.3 Absorption spectra of brown rice seeds preprocessed by FD

此外,基线偏移也会对模型的精准性造成影响。为消除光源变化、检测器变化以及环境影响导致的基线漂移,对原始光谱数据求导进行校正。采用一阶导数处理,不仅消除了基线漂移,还可以提高光谱分辨率。图3为光谱数据经一阶导数预处理后的光谱图。

### 3.3 近红外光谱数据的降维

近红外光谱属于典型的高维度、非线性、重叠冗余数据,为提取光谱特征以及定量定性建模带来一定的挑战和困难,尤其是在近红外光谱分析中。由于光谱测量中噪声、散射效应、样品物理状态等因素,导致光谱与样品组分之间存在非线性关系<sup>[17]</sup>。光谱数据的高维特点引起的复共线性,是建模中经常遇到的问题。需要一种降维方法来减少噪声、冗余,降低过度拟合的可能性。目前,数据降维最常用的方法是主成分分析(PCA)<sup>[18]</sup>,PCA的思想是将 $n$ 维特征映射到 $k$ 维度空间上( $k < n$ ),这 $k$ 维空间是全新的正交特征,不是从 $n$ 维空间中去除 $n-k$ 维度特征,而是重新构造出来的 $k$ 维特征。PCA是线性变换, $k$ 维特征是 $n$ 维特征的线性组合,使用的依然是全部光谱数据,无法保证低维空间数据的非线性结构。

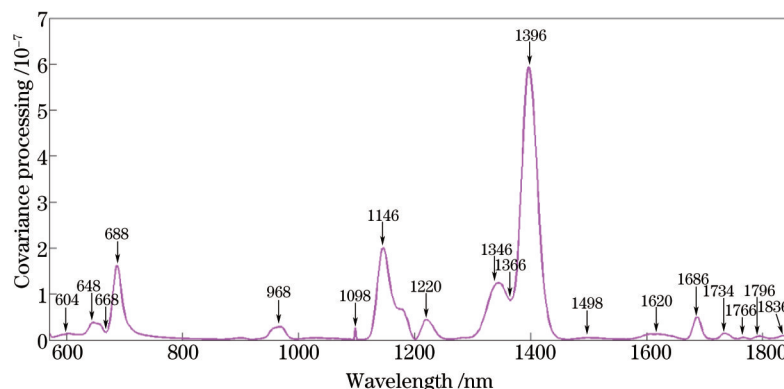


图4 糙米协方差光谱

Fig.4 Absorption spectra of brown rice seeds processed by CP



实验采用特征光谱提取方法,对光谱数据进行降维处理。通过对一阶导数光谱进行协方差处理(CP),提取近红外光谱特征波长。协方差光谱如图4所示。

由图4可见,在570~1848 nm波段有18个吸收峰,分别为604、648、668、688、968、1098、1146、1220、1346、1366、1396、1498、1620、1686、1734、1766、1796、1836 nm(依次记为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{18}$ ),波峰波谷起伏较大,有丰富的吸收信息。

### 3.4 模型的建立与验证

#### 3.4.1 不同建模方法的选择

目前常用的建模方法包括PCR<sup>[19]</sup>、PLS<sup>[20]</sup>、人工神经网络(ANN)<sup>[21-22]</sup>等。以18个特征波长对应的光谱作为模型输入,分别应用PCR、PLS、BP神经网络和GRNN建立糙米发芽率模型,分析结果如表2所示。由表2可见,采用GRNN建立的模型最优, $R_c$ 和SEC分别为0.9812、1.6374, $R_p$ 与SEP分别为0.9515、2.3075,相关系数达到较高水平且标准偏差相对其他建模方法较小。

表2 不同方法的建模结果

Table 2 Statistical results of different modeling methods

Modeling method	Calibration set		Prediction set	
	$R_c$	SEC	$R_p$	SEP
PCR	0.8421	3.6386	0.8215	4.3125
PLS	0.9102	2.5634	0.8927	3.0179
BP	0.9641	2.2202	0.9340	2.6423
GRNN	0.9812	1.6374	0.9515	2.3075

#### 3.4.2 特征波长的选择

根据图4光谱吸收峰的分布,分别从 $\lambda_1 \sim \lambda_{18}$ 中进一步选取贡献率较大的特征波长,通过GRNN建立稻种发芽率近红外预测模型,模型评估指标如表3所示。

表3 不同特征波段的建模结果

Table 3 Statistical results of models based on different wavelengths

Wavelength	Calibration set		Prediction set	
	$R_c$	SEC	$R_p$	SEP
$\lambda_1 \sim \lambda_{18}$	0.9812	1.6374	0.9515	2.3075
$\lambda_2, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{13}, \lambda_{14}$	0.9658	2.0856	0.9501	2.4010
$\lambda_2, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$	0.9666	2.1313	0.9340	3.4120
$\lambda_2, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$	0.9679	2.6465	0.9402	2.5618
$\lambda_2, \lambda_4, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$	0.9665	2.0635	0.9305	2.3764
$\lambda_4, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$	0.9649	2.1980	0.9280	2.5010
$\lambda_4, \lambda_7, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$	0.9743	1.9161	0.9505	2.3423
$\lambda_4, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_{11}$	0.9169	3.1911	0.9140	2.7962
$\lambda_4, \lambda_7, \lambda_{10}$	0.8820	3.7583	0.8018	4.1792

由表3可见,采用全部特征波长建立的模型精度最高,但数据维度较高。综合考虑数据维度和模型精度,以 $\lambda_4, \lambda_7, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$ 为特征波长建立的模型最优。

### 3.5 模型预测性能的评价

通过SNV、FD预处理,提取 $\lambda_4, \lambda_7, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{14}$ 为特征波长,结合GRNN建立的发芽率预测模型最优。最优模型的校正集预测值与实际值之间的关系如图5所示, $R_c$ 和SEC分别为0.9743、1.9161,预测集预测值与实际值之间的关系如图6所示, $R_p$ 和SEP分别为0.9505、2.3423。

结果表明,校正集和验证集相关系数均超过95%且标准偏差较小,说明该模型在糙米发芽率预测方面有较好的预测能力。

## 4 讨论与结论

已有农学研究表明,种子发芽能力主要取决于种子的胚,种子老化后,胚发生一系列生理学变化:酶的

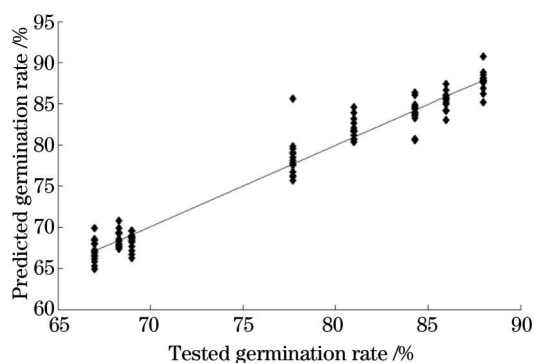


图5 校正集预测值与实际值之间的关系

Fig.5 Correlation between predicted and actual values in calibration set

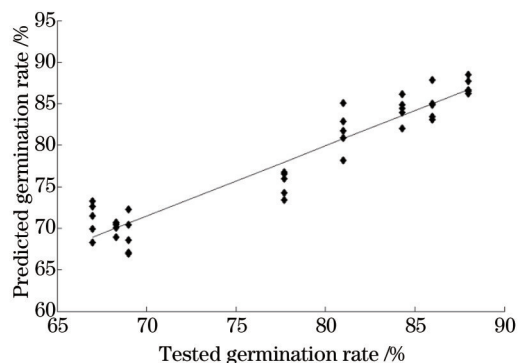


图6 预测集预测值与实际值之间的相关关系

Fig.6 Correlation between predicted and actual values in prediction set

活性发生变化,合成物质能力下降,有毒物质积累,蛋白质发生变化,糙米膜的结构和通透性会发生变化,膜系统损伤,导致水稻膜物质发生变化<sup>[23-24]</sup>。该研究将水稻种子去壳处理后,对糙米进行近红外光谱的采集和分析,探讨稻种膜的物质变化及其近红外光谱特性与发芽率之间的关系,从而更直接地从种子生理学特性方面揭示稻种发芽率的光谱变化。

利用近红外光谱分析技术和广义回归神经网络建立糙米发芽率快速检测模型。采用SNV、FD预处理方法,通过特征光谱提取获得贡献率较大的特征波长;以688、1146、1346、1366、1396、1686 nm对应的光谱数据为输入,通过GRNN建立的模型最优, $R_c$ 和SEC分别为0.9743、1.9161, $R_p$ 与SEP分别为0.9505、2.3423。校正集和验证集相关系数均大于95%且相对偏差较小,表明近红外光谱检测技术在糙米发芽率测定方面具有较高的精度和较好的预测性能。因此近红外光谱检测技术可以作为糙米发芽率的测定方法,应用于糙米发芽率快速检测。

随着LED技术的快速发展,各种超高亮、不同波长的窄带LED不断涌现,LED发射波长几乎覆盖了整个紫外-近红外光谱区,包括本文稻种发芽率检测的特征波长(688、1146、1346、1366、1396、1686 nm)。提出的基于特征光谱的非线性降维方法,以波长688、1146、1346、1366、1396、1686 nm处的光谱作为输入,通过GRNN实现糙米发芽率快速检测,为便携式水稻发芽率光谱仪的研制提供了理论依据。

### 参考文献

- Xin Liangjie, Li Xiubin. Changes of multiple cropping in double cropping rice area of southern China and its policy implications[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 58-65.  
辛良杰, 李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 58-65.
- Sun Qun, Wang Qing, Xue Weiqing, *et al.*. Advances in nondestructive detection of seed quality[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(3): 1-6.  
孙群, 王庆, 薛卫青, 等. 无损检测技术在种子质量检验上的应用进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(3): 1-6.
- Guo Peiyuan, Lin Yan, Fu Yan, *et al.*. Research on freshness level of meat based on near-infrared spectroscopic technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 033002.  
郭培源, 林岩, 付妍, 等. 基于近红外光谱技术的猪肉新鲜度等级研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 033002.
- 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, 林颢, 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.
- Cheng Jimeng, Li Weiwei, Zhao Guoying, *et al.*. Temperature characteristics of near-infrared luminescence of Yb-doped bismuth-based glasses[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1015001.  
程继萌, 李韦韦, 赵国营, 等. 掺铋铋酸盐玻璃近红外发光的温度特性[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1015001.
- Huang Furong, Luo Yunhan, Zheng Shifu, *et al.*. Near-infrared spectroscopic analysis and model optimization on cholesterol and triglyceride in whole blood[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1030001.  
黄富荣, 罗云瀚, 郑仕富, 等. 全血胆固醇、甘油三酯近红外光谱分析与模型优化[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1030001.

- 7 Xu Lei, Xia Haiping. Multi-metal sulfide for absorbing near infrared light[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0606001.  
徐磊, 夏海平. 多元金属硫化物的近红外吸收性能[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0606001.
- 8 Liang Jian, Liu Binmei, Tao Liangzhi, *et al.*. Research on methods of variety identification for rice seeds based on their characteristic of near infrared spectra[J]. The Journal of Light Scattering, 2013, 25(4): 423-428.  
梁剑, 刘斌美, 陶亮之, 等. 基于水稻种子近红外特征光谱的品种鉴别方法研究[J]. 光散射学报, 2013, 25(4): 423-428.
- 9 Rudolphi S, Becker H C, Schierholt A, *et al.*. Improved estimation of oil, linoleic and oleic acid and seed hull fractions in safflower by NIRS[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2012, 89(3): 363-369.
- 10 Han Liangliang, Mao Peisheng, Wang Xinguo, *et al.*. Study on vigour test of oat seeds with near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2): 86-90.  
韩亮亮, 毛培胜, 王新国, 等. 近红外光谱技术在燕麦种子活力测定中的应用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 86-90.
- 11 Agelet L E, Ellis D D, Duvick S, *et al.*. Feasibility of near infrared spectroscopy for analyzing corn kernel damage and viability of soybean and corn kernels[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(2): 160-165.
- 12 Xie L H, Tang S Q, Chen N, *et al.*. Optimisation of near-infrared reflectance model in measuring protein and amylose content of rice flour[J]. Food Chemistry, 2014, 142: 92-100.
- 13 Zhi Juzhen, Bi Xinhua, Du Kemin, *et al.*. GB/T3543.4-1995 Rules for agricultural seed testing - germination test[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 1995.  
支巨振, 毕辛华, 杜克敏, 等. GB/T3543.4-1995农作物种子检验规程-发芽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- 14 Xu Huibin, Wei Yidong, Lian Ling, *et al.*. Comparative analysis of artificial aging and natural aging with rice seeds[J]. Molecular Plant Breeding, 2013, 11(5): 552-556.  
许惠滨, 魏毅东, 连玲, 等. 水稻种子人工老化与自然老化的分析比较[J]. 分子植物育种, 2013, 11(5): 552-556.
- 15 Christy C D. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(1): 10-19.
- 16 Brunet D, Barthès B G, Chotte J L, *et al.*. Determination of carbon and nitrogen contents in alfisols, oxisols and ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity[J]. Geoderma, 2007, 139(1): 106-117.
- 17 Gong Huili. Feature Extraction and Similarity Measure on Tobacco Near Infrared Spectra[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.  
宫会丽. 烟叶近红外光谱特征提取与相似性度量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- 18 Sinelli N, Limbo S, Torri L, *et al.*. Evaluation of freshness decay of minced beef stored in high-oxygen modified atmosphere packaged at different temperatures using NIR and MIR spectroscopy[J]. Meat Science, 2010, 86(3): 748-752.
- 19 Balabin R M, Lomakina E I, Safieva R Z. Neural network (ANN) approach to biodiesel analysis: Analysis of biodiesel density, kinematic viscosity, methanol and water contents using near infrared (NIR) spectroscopy[J]. Fuel, 2011, 90(5): 2007-2015.
- 20 Zhang W J, Liu R, Zhang W, *et al.*. Net analyte signal with floating reference theory in non-invasive blood glucose sensing by near-infrared spectroscopy[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(8): 70-73.
- 21 Chen K J, Huang M. Prediction of milled rice grades using Fourier transform near-infrared spectroscopy and artificial neural networks[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(2): 221-226.
- 22 Liu Boping, Qin Huajun, Luo Xiang, *et al.*. Multicomponent quantitative analysis using near infrared spectroscopy by building PLS-GRNN model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(11): 2216-2220.  
刘波平, 秦华俊, 罗香, 等. PLS-GRNN法近红外光谱多组分定量分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(11): 2216-2220.
- 23 Han Rui. Studies on Physio-Biochemical Changes, DNA Damages and Invigoration in Artificial Aged Rice Seeds[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.  
韩瑞. 人工老化水稻种子生理生化变化、DNA损伤及活力恢复的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- 24 Xu Pengyu, Deng Hongping, Zhang Jiahui, *et al.*. Analysis of differential expression of seed embryo protein in the artificial aging process in rice[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(12): 1-7.  
胥鹏宇, 邓洪平, 张家辉, 等. 水稻种子胚人工老化过程中蛋白质差异表达分析[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(12): 1-7.

栏目编辑: 吴秀娟