

基于高光谱成像技术结合PCA-GRNN的糙米发芽率检测方法研究

于施淼¹ 卢伟¹ 梁琨¹ 洪德林² 党晓景²

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 水稻是人类的主要粮食作物,其发芽率是评定水稻质量的重要指标之一。以南粳46为研究对象,利用高光谱成像技术预测剥壳后的稻种(以下简称糙米)发芽率。在400~1000 nm波长范围内,采集960粒饱满、无霉变糙米的高光谱图像,提取感兴趣区域的平均光谱曲线,利用主成分分析(PCA)提取特征波长,再结合偏最小二乘法(PLS)、反向传播神经网络(BPNN)、径向基神经网络(RBFNN)和广义回归网络(GRNN)4种建模方法分别对糙米5个区域特征波长的光谱数据建立预测模型并加以比较。4种建模方法对糙米A区域(含胚芽)的平均预测效果最好($\bar{R}_p=0.970$),其中,GRNN模型对该区域预测精度最高($R_p=0.982$, $f_{\text{RMSEP}}=0.978$)。研究结果表明利用高光谱成像技术并结合PCA和GRNN检测糙米发芽率是可行的。

关键词 光谱学; 高光谱成像; 主成分分析; 广义回归网络; 发芽率; 糙米

中图分类号 S511 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.113001

Study on Prediction of Germination Rate of Rice Seeds Using Hyperspectral Imaging Combined with PCA and GRNN

Yu Shimiao¹ Lu Wei¹ Liang Kun¹ Hong Delin² Dang Xiaojing²

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

²State Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract Rice is the main food crop for human beings, whose germination rate is one of the most important indexes to evaluate rice quality. The germination rate of brown rice named Nan Jing 46 is predicted by using hyperspectral imaging system. Hyperspectral images of 960 samples which are full and not moldy are captured, and the spectral region is from 400 nm to 1000 nm. The mean spectra are extracted from the region of interest of each image and principal component analysis (PCA) is applied to select characteristic wavelengths from the full-spectrum. The prediction models are established based on spectrum data of characteristic wavelengths of different rice parts using 4 prediction methods, including partial least squares (PLS), radial basis function neural network (RBFNN), general regression neural network (GRNN) and back-propagating neural network (BPNN). After repeated tests, the top area of brown rice (containing the germ) is chosen as the characteristic part, which has the best prediction performance ($\bar{R}_p=0.970$). The order of the prediction accuracy from low to high is PLS, BPNN, RBGNN, GRNN. Among these methods, GRNN has the highest prediction accuracy ($R_p=0.982$, $f_{\text{RMSEP}}=0.978$). The results indicate that it is feasible to detect the germination rate of brown rice by the hyperspectral imaging system.

Key words spectroscopy; hyperspectral imaging; principal component analysis; general regression neural network; germination rate; brown rice

OCIS codes 300.6320; 100.4145; 070.4790

收稿日期: 2015-04-22; 收到修改稿日期: 2015-05-22; 网络出版日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(31401610)、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)

作者简介: 于施淼(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: yushimiao_njau@163.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)

1 引言

水稻是我国主要的粮食作物,其发芽率直接影响到我国水稻的产量和质量^[1]。确保水稻生产能够满足我国众多人口的稻米消费需求,是保证我国粮食安全的重要内容。目前,测定种子发芽率的主要方法有直接测定法和间接测定法,其中,直接测定法是通过发芽实验来直接测定种子发芽率,而间接测定法则是通过测定水稻生活力、活力等指标来间接估测水稻发芽率^[2]。

高光谱成像技术结合了传统的成像和光谱学,能够同时获得对象的空间和光谱信息,在对果蔬内外品质检测中均取得了较好的结果,是当前农产品无损检测的研究热点^[3-6]。在检测水稻方面,张亚彪等^[7]构建了水稻叶片色素模型,分析 1450 nm 处水稻叶片光谱特征随叶片含水量的波动,表明高光谱能快速检测水稻的生理生化指标。Kong 等^[8]利用偏最小二乘判别分析法(PLS-DA)、簇类独立软模式法(SIMCA)、K 最近邻节点算法(KNN)、支持向量机(SVM)和随机森林(RF)机器学习算法对提取的 12 个特征波长建立预测模型,对水稻种子品种进行鉴别,准确率均达到 80% 以上。黄双萍等^[9]基于高光谱成像提出光谱词袋模型分析方法,用于水稻穗瘟病害程度分级。邓小琴等^[10]利用高光谱技术结合偏最小二乘法,在少量波段情况下有效提高水稻种子品种单粒鉴别的精度。李美凌等^[11]利用高光谱图像技术对水稻种子活力进行检测研究,利用主成分分析(PCA)和独立成分分析(ICA)结合 SVM 建立预测模型,将老化 48 h 与未老化的稻种进行对比分析,得出高光谱技术可以用于鉴定稻种活力的结论。此外,李毅念等^[12]结合近红外光谱技术和偏最小二乘法(PLS)建立杂交水稻种子发芽率检测模型,在理论上实现了对稻种发芽率的定量检测。但是,当前国内外关于高光谱成像技术检测糙米发芽率的研究却鲜有报道。

本文利用高光谱成像技术,研究老化时间对糙米光谱反射率的影响,利用 PCA 提取特征波长,以特征波长下的光谱反射率作为输入量,建立糙米发芽率与高光谱反射率的多种预测模型并比较预测效果,旨在为今后快速、准确、无损地检测水稻发芽率提供新的方法。

2 材料与方 法

2.1 实验材料

2.1.1 采 样

实验所采用的水稻品种为南粳 46,于 2014 年收获于南京农业大学江浦实验田,由南京农业大学农学院提供。经筛选,共选取 960 粒较饱满、无霉变的水稻种子进行剥壳处理,存放在保鲜袋中,置于冰箱中 4 ℃ 冷藏。

2.1.2 老化处理

将上述 960 粒糙米样本分成 8 份,每份 120 粒,放在按 0~7 顺序编号的洁净烧杯内。其中,0 号样本不做老化处理,按照 40 ℃、100% 相对湿度的高温高湿老化方法,将 1~7 号样本放入恒温箱内,老化时间分别为 24、48、72、96、120、144、168 h,每份经老化处理的糙米放在太阳下暴晒 3 d 后,共得到 8 个老化梯度的糙米样本。为避免混淆,将 8 份样本分别放入牛皮纸袋内,再将牛皮纸袋放入塑料密封袋中,按照老化程度进行编号,置于冰箱中 4 ℃ 冷藏。

2.2 实验装置

高光谱成像系统的结构如图 1 所示,由图像光谱仪(Inspector V10E,芬兰)、CCD 摄像头、2 个 150 W 的视觉配套光源、电控位移台及控制器、暗箱和计算机等部件组成,台湾五铃光学公司生产。能够采集的光谱

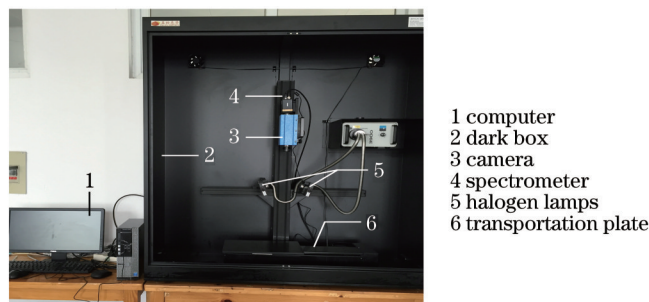


图 1 高光谱成像系统

Fig.1 Hyperspectral imaging system

范围为 400~1000 nm,光谱分辨率为 2.8 nm。

2.3 图像采集和校正

整个实验过程中高光谱成像系统始终置于完全不透明的黑色箱体中,为得到清晰的图像,在采集图像数据前应首先设定初始值。经过反复调整,最终确定摄像机曝光时间为 0.095 s,电控位移平台的运动速度为 2 mm/s,糙米样本间距为 20 mm。

由于各波段下光强度分布不均匀且传感器中存在暗电流,导致光照强度较弱的波段下,获得的图像噪声较大,需进行黑白校正^[13-14]。在同样的参数条件下,首先扫描反射率为 99%的标准白色校正板得到全白标定图像 W ;关闭相机快门,得到全黑标定图像 B ;最后由原始图像 I 计算得到标定后的相对图像 R ,

$$R = \frac{I - B}{W - B} \quad (1)$$

实验中使用 ENVI4.8 软件提取光谱图像和数据,再利用 Matlab 7.11 对图像和数据进行进一步分析。将每份 120 粒样本按 2:1 的比例随机分为校正集(80 粒)和验证集(40 粒),所以共得到校正集 640 粒和验证集 320 粒。

2.4 发芽实验

为快速获取糙米发芽率,实验采用人工加速老化法,从经过高光谱扫描的每组样本中随机选取 60 粒,共 480 粒进行发芽实验。首先将不同老化程度的糙米按序号放入装有清水的 200 mL 烧杯中,再将烧杯放入 25 °C 培养箱(宁波江南仪器厂)中浸种 24 h,浸种完成后,将糙米按序号放入垫有 2 层滤纸的发芽床中,加水湿润,相邻种子之间留有种子直径 5 倍以上的间距,盖好盖子后放入 25 °C RXZ 系列智能人工气候培养箱(宁波江南仪器厂)中,按照 GT/T 3543.1~3543.7-1995 发芽技术规程^[15]的要求培养 14 d。每天记录一次不同老化程度糙米的发芽情况,第 14 天计算发芽率。

2.5 数据处理方法

2.5.1 预处理方法

PCA 是一种数学变换方法,将给定的一组相关变量通过线性变化转换为另一组不相关的变量。这些新的变量按照方差依次递减排列,且第一变量具有最大方差,称为第一主成分。在所有主成分中,按照贡献率即权重系数的大小选出最佳波长^[16]。

2.5.2 建模方法

PLS 是一种线性化学计量学方法,常用于定性和定量分析^[17]。PLS 分别在自变量矩阵 X 和因变量矩阵 Y 中进行主成分分解,提取若干对系统具有最佳解释能力的新综合变量,再对新综合变量进行回归建模^[18],其主元个数等于提取的特征向量数。

反向传播神经网络(BPNN)是一种前馈型人工神经网络算法,能够反映输入到输出的非线性关系^[19]。BPNN 包含 3 层网络,输入层、中间层(隐层)和输出层。输入层和中间层的传递函数为正切 S 型函数,输出层传递函数为线性函数。BPNN 的隐层节点数 N 及其上限 L 的经验公式为^[20]

$$N = \sqrt{m + n + k}, \quad (2)$$

$$L = \sqrt{m(n + 3) + 1}, \quad (3)$$

式中 m 为输入神经元数目, n 为输出神经元数目, k 为 1~10 之间的经验整数。

径向基神经网络(RBFNN)是一种 3 层前向型神经网络,包含一个输入层、一个具有径向基函数神经元的隐含层和一个具有线性神经元的输出层,具有收敛速度快、稳健性好等优点,在模式识别领域的应用日益广泛^[21]。

广义回归网络(GRNN)是由德国人 Specht 于 1991 年首先提出的新型局部逼近神经网络算法,由一个隐含层和一个线性输出层组成,隐含层的隐节点数等于训练样本数,其传递函数通常为高斯函数^[22]:

$$R_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (4)$$

式中 σ_i 决定第 i 层隐含层位置中基函数的形状,称为光滑因子, σ_i 越大则基函数越平滑。第 2 层为线性输出层,其传递函数为线性函数。GRNN 的隐含层和输出层的神经元个数等于输入的样本矢量个数。

针对糙米不同部位,比较上述 4 种建模方法的预测效果,筛选特征部位和最优方法。

3 结果与分析

3.1 糙米发芽率

统计480粒糙米的发芽率,实验结果以粒数的百分比表示,按照老化程度进行区分,发芽率实验结果如表1所示。从表1可以看出,随着老化程度的加深,水稻品种南粳46糙米发芽率逐渐降低。说明人工加速老化方法加速了种子裂变过程,改变了种子的生理生化特性,使得种子发芽率降低^[23]。

表1 不同老化时间的糙米发芽率

Table 1 Germination rate of brown rice with different aging time

Aging time /h	Germination rate /%	Number of calibration set	Number of prediction set
0	96.7±2.4	80	40
24	90.0±3.2	80	40
48	83.3±2.0	80	40
72	78.3±1.3	80	40
96	70.0±4.5	80	40
120	66.7±1.8	80	40
144	63.3±2.6	80	40
168	61.7±3.5	80	40

3.2 划分糙米区域并提取光谱曲线

水稻种子主要包括3个部分,果皮和种皮、胚和胚乳,其中,果皮和种皮主要起到保护种子内部结构的作用,胚乳主要为种子萌发时胚的发育提供营养,而胚包含胚芽、胚轴、胚根和子叶,是新植物的幼体,如果胚受到损伤或失去活力,则种子无法萌发。胚是种子中最重要的部分^[24],为探究预测效果最好的糙米部位,将单个糙米的光谱图像分为如图2所示的A(含胚芽)、B、C、D、E 5个区域。上下两区域A和C的宽度以胚芽所在位置的长度为基准,糙米中部以种子最宽处的1/3作为划分后每个区域的宽度,均分为B、D、E 3部分。每个区域选取一个30 pixel×30 pixel的感兴趣区域(ROI),提取其平均光谱曲线。

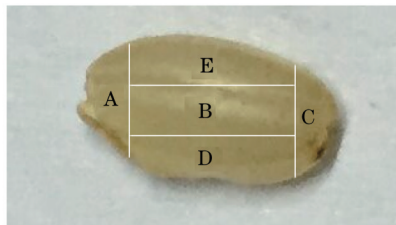


图2 糙米分区示意图

Fig.2 Schematic diagram of brown rice partition

糙米图像B区域的平均光谱曲线如图3所示。由图3可见,光谱曲线走势基本相同,400 nm之前和900 nm之后的波段噪声较大,因此,选取400~900 nm范围内的光谱曲线进行研究。另外,430~570 nm之间的光谱曲线上升比较平缓,590~810 nm之间的光谱曲线较陡,上升幅度增大,810 nm之后趋于平缓。其中,590~810 nm波段曲线呈凹槽型,光谱反射率差异较大,反映了糙米内部成分的变化,说明老化处理对糙米的

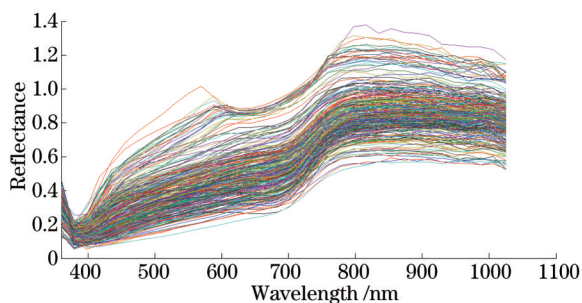


图3 糙米原始光谱曲线

Fig.3 Original spectra of brown rice

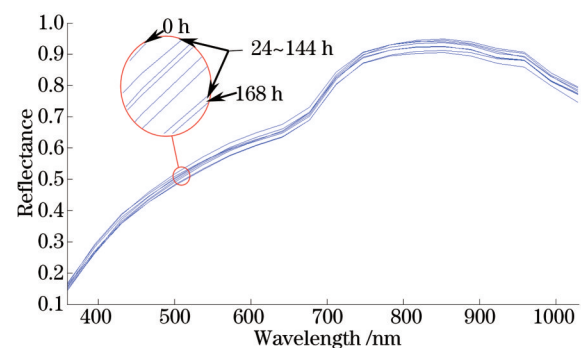


图4 老化不同时间的糙米平均光谱曲线

Fig.4 Average spectra of brown rice with different aging time

发芽率产生影响。

图4为经过去噪处理的老化不同时间糙米的平均光谱曲线图。可以看出,随着老化程度加深,糙米的光谱反射率呈下降趋势,糙米发芽率也随着老化程度加深而降低,说明糙米发芽率与其光谱反射率之间存在相关性。

3.3 提取特征波长

高光谱图像是包含图像和光谱的三维图像,信息量较大。为降低数据维数、减少冗余信息,需对光谱数据提取特征波长。糙米图像的每一个像素点均含有不同波长的光谱信息,因此将A、B、C、D、E区域内选取的5个ROI整体作为感兴趣区域进行特征提取。图5为经PCA处理后得到的各波长权重系数图,每一处波峰表示特征波长。因此,选择的7个特征波长分别为447、508、594、675、742、820、893 nm。

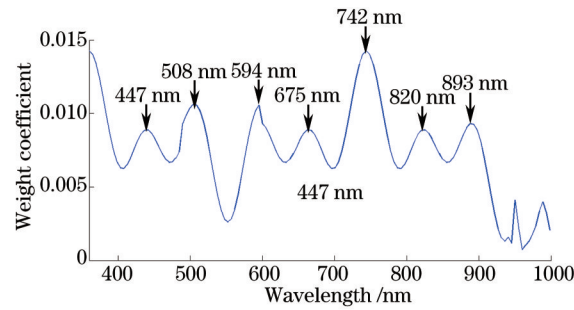


图5 波长的权重系数

Fig.5 Weight coefficients of different wavelengths analyzed by PCA

3.4 建立预测模型

将特征波长处的反射率作为输入量,糙米发芽率作为输出量,利用PLS、BPNN、GRNN和RBFNN建立4种预测模型。

光滑因子越小,GRNN对样本的逼近性能越强;光滑因子越大,GRNN对样本的逼近过程越平滑。将光滑因子分别设置为0.01,0.02,0.03,0.04,0.05,在不同训练样本数(3~8个)条件下,光滑因子的不同对网络逼近均方根误差值 f_{RMSE} 的影响如图6所示。可以看出,无论训练样本数为多少,当光滑因子选择0.01时, f_{RMSE} 均为最小值。

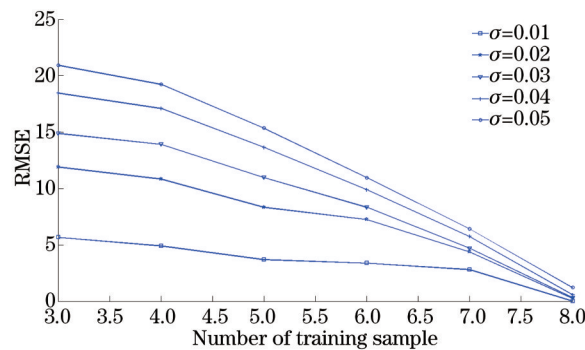


图6 GRNN的逼近误差

Fig.6 f_{RMSE} value of GRNN

经反复测试,最终确定模型参数为:BPNN的输入节点数为8,隐层节点数目为3,输出节点数为1;GRNN隐节点数为8,光滑因子取0.01,输入神经元数目为8,输出神经元数目为1。预测精度如表2所示。

观察表2可以看到,GRNN对糙米A区域(含胚芽)的预测精度最高($R_p=0.982$, $f_{RMSEP}=0.978$),4种方法对A区域(含胚芽)的相关系数均值为0.970,对B区域的相关系数均值为0.960,对C区域的相关系数均值为0.961,对D区域的相关系数均值为0.959,对E区域的相关系数均值为0.958,糙米A区域的预测效果最好。4种建模方法平均预测精度从低到高排序依次为PLS($\bar{R}_p=0.946$, $\bar{f}_{RMSEP}=2.386$),BPNN($\bar{R}_p=0.958$, $\bar{f}_{RMSEP}=2.125$),RBFNN($\bar{R}_p=0.967$, $\bar{f}_{RMSEP}=1.908$),GRNN($\bar{R}_p=0.976$, $\bar{f}_{RMSEP}=1.564$)。因此最终选取糙米A区域(含胚芽)作为特征部位,利用GRNN对其建模,预测效果如图7所示。

表2 不同建模方法预测精度

Table 2 Prediction accuracy of different models

Different areas	Modeling methods	Calibration set		Prediction set	
		R_c	f_{RMSEC}	R_p	f_{RMSEP}
A (containing the germ)	PLS	0.943	2.48	0.957	2.05
	BPNN	0.954	2.27	0.966	1.96
	RBFNN	0.968	1.92	0.974	1.61
	GRNN	0.985	0.947	0.982	0.978
B	PLS	0.937	2.62	0.941	2.75
	BPNN	0.946	2.23	0.953	2.44
	RBFNN	0.973	1.73	0.964	2.06
	GRNN	0.983	1.13	0.981	1.28
C	PLS	0.924	3.25	0.937	2.62
	BPNN	0.942	2.56	0.962	1.95
	RBFNN	0.956	2.18	0.966	1.96
	GRNN	0.975	1.54	0.979	1.74
D	PLS	0.948	2.3	0.947	2.28
	BPNN	0.943	2.48	0.952	2.36
	RBFNN	0.969	1.82	0.965	1.98
	GRNN	0.972	1.83	0.974	1.87
E	PLS	0.945	2.39	0.946	2.23
	BPNN	0.954	2.27	0.957	2.05
	RBFNN	0.951	2.64	0.968	1.93
	GRNN	0.964	2.06	0.962	1.95

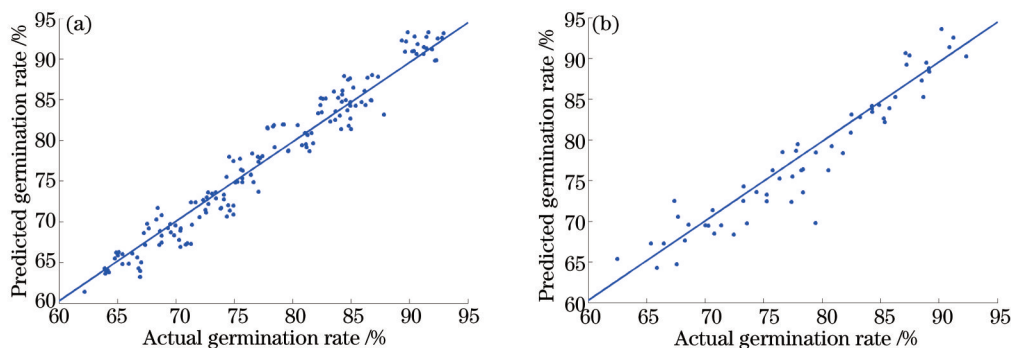


图7 经 GRNN 处理的(a)校正集和(b)验证集回归模型效果

Fig.7 Performance of GRNN for (a) the calibration set and (b) the prediction set

4 结 论

利用高光谱成像技术对剥壳后的水稻种子(糙米)发芽率进行无损预测,探究高光谱反射率与糙米发芽率之间的关系。首先利用PCA对糙米光谱数据提取7个特征波长447、508、594、675、742、820、893 nm,将糙米分为A(含胚芽)、B、C、D、E 5个区域,再结合PLS、BPNN、RBFNN、GRNN 4种建模方法分别对糙米不同区域、不同特征波长的发芽率进行建模预测。结果表明,糙米A区域(含胚芽)的预测效果最好,可作为预测分析的特征部位,且GRNN对A区域预测效果最好($R_p=0.982$, $f_{RMSEP}=0.978$),证明了高光谱成像技术用于检测糙米发芽率是可行的。

老化处理使得种子发芽率降低,主要原因是糙米内部生理生化特性发生改变:膜脂过氧化,膜透性增加;内源激素失衡^[25];酶活性降低^[26];电导率发生变化^[27]等。利用高光谱技术对去壳稻种进行发芽率预测研究,能够更直观地揭示种子生理生化特性与高光谱反射率之间的关系。预测模型对糙米A区域的预测精度最高,不同区域的预测模型精度只有细微差异,说明对糙米整体进行建模研究的方法是可行的。提取有限

个数的特征波长,不仅可以降低数据维数、减少输入量、提高效率,还可为今后基于有限特征波长设计手持式稻种发芽率快速检测仪提供理论依据。

参考文献

- 1 Zhao Guowei. Measures of how to enhance the germination rate of rice seeds[J]. Private Technology, 2014, 17: 195.
赵国伟. 阐述提高水稻种子发芽率的措施[J]. 民营科技, 2014, 17: 195.
- 2 Shi Yaping, Cai Jingping. Study on rapid determination of seed germination rate[J]. Cereals and Oils Processing, 2008, 2: 13-14.
石亚萍, 蔡静平. 种子发芽率快速测定方法的研究进展[J]. 中国种业, 2008, 2: 13-14.
- 3 Xiong Z, Sun D W, Dai Q, *et al.*. Application of visible hyperspectral imaging for prediction of springiness of fresh chicken meat[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(2): 380-391.
- 4 Mahesh S, Jayas D S, Paliwal J, *et al.*. Comparison of partial least squares regression (PLSR) and principal components regression (PCR) methods for protein and hardness predictions using the near-infrared (NIR) hyperspectral images of bulk samples of Canadian wheat[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(1): 31-40.
- 5 Zhao Jiewen, Hui Zhe, Huang Lin, *et al.*. Quantitative detection of TVB-N content in chicken meat with hyperspectral imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 073003.
赵杰文, 惠 喆, 黄 林, 等. 高光谱成像技术检测鸡肉中挥发性盐基氮含量[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 073003.
- 6 Zhang Baohua, Huang Wenqian, Li Jiangbo, *et al.*. Detection of bruises and early decay in apples using hyperspectral imaging and PCA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2): 279-283.
张保华, 黄文倩, 李江波, 等. 用高光谱成像和 PCA 检测苹果的损伤和早期腐烂[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 279-283.
- 7 Zhang Yabiao, Luo Ju, Tang Jian, *et al.*. Hyperspectral characteristics of rice leaves and their pigment and water content analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(7): 40-44.
张亚彪, 罗 举, 唐 健, 等. 不同品种水稻叶片的高光谱特征及其色素, 含水率分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(7): 40-44.
- 8 Kong W, Zhang C, Liu F, *et al.*. Rice seed cultivar identification using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate data analysis[J]. Sensors, 2013, 13(7): 8916-8927.
- 9 Huang Shuangping, Qi Long, Ma Xu, *et al.*. Grading method of rice panicle blast severity based on hyperspectral image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 212-219.
黄双萍, 齐 龙, 马 旭, 等. 基于高光谱成像的水稻穗瘟病害程度分级方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 212-219.
- 10 Deng Xiaoqin, Zhu Qibing, Huang Min. Variety discrimination for single rice seed by integrating spectral, texture and morphological features based on hyperspectral image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021001.
邓小琴, 朱启兵, 黄 敏. 融合光谱、纹理及形态特征的水稻种子品种高光谱图像单粒鉴别[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021001.
- 11 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.
- 12 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, 刘璿璩, 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.
- 13 Cai Jianrong, Wang Jianhei, Huang Xingyi, *et al.*. Detection of rust in citrus with hyperspectral imaging technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 26-30.
蔡健荣, 王建黑, 黄星奕, 等. 高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 26-30.
- 14 Liu Minfa, Zhang Lingbiao, He Jianguo, *et al.*. Study on non-destructive detection of pesticide residues on Lingwu long jujubes' surface using hyperspectral imaging[J]. Food & Machinery, 2014, 5: 87-92.
刘民法, 张令标, 何建国, 等. 基于高光谱成像技术的长枣表面农药残留无损检测[J]. 食品与机械, 2014, 5: 87-92.
- 15 National Standardization Technical Committee. GB/T 3543.1~3543.7-1995 Rules for agricultural seed testing[S]. Beijing: China Standard Press, 1995.
国家标准化技术委员会. GB/T 3543.1~3543.7-1995农作物种子验证规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

- 16 Chen Quansheng, Zhang Yanhua, Wan Xinmin, *et al.*. Study on detection of pork tenderness using hyperspectral imaging technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2602–2607.
陈全胜, 张燕华, 万新民, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2602–2607.
- 17 Xiong Z, Sun D W, Dai Q, *et al.*. Application of visible hyperspectral imaging for prediction of springiness of fresh chicken meat[J]. *Food Analytical Methods*, 2015, 8(2): 380–391.
- 18 Yu Xiaoya, Zhang Yujun, Yin Gaofang, *et al.*. Feature wavelength selection of phytoplankton fluorescence spectra based on partial least squares[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0930002.
余晓娅, 张玉钧, 殷高方, 等. 基于偏最小二乘回归的藻类荧光光谱特征波长选取[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0930002.
- 19 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.
- 20 Sun Zhonghua, Wang Jue, Qu Zhong. Application of neural networks based on GA to identification of loading materials for initiating explosive device[J]. *Microcomputer Development*, 2003, 13(8): 3–5.
孙忠华, 王 珏, 瞿 中. 基于GA的神经网络在火炸药剂辨识中的应用[J]. *微机发展*, 2003, 13(8): 3–5.
- 21 Liu Zaiwen, Li Mengxun, Wang Xiaoyi, *et al.*. The method of mid-term and short-term prediction for water bloom based on LSSVM and RBFNN[J]. *Computer and Applied Chemistry*, 2012, 29(10): 1189–1194.
刘载文, 李梦寻, 王小艺, 等. 基于LSSVM和RBFNN的水华中短期预测方法[J]. *计算机与应用化学*, 2012, 29(10): 1189–1194.
- 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 Wu Julan, Zhou Xiaomei, Fan Lingjuan, *et al.*. Effects of artificial aging on seed vigor, physiological and biochemical characteristics of soybean seeds[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(6): 582–587.
吴聚兰, 周小梅, 范玲娟, 等. 人工老化对大豆种子活力和生理生化特性的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(6): 582–587.
- 24 Cheng Hong, Shi Zhixing, Yin Huijuan, *et al.*. Detection of multi-corn kernel embryos characteristic using machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 145–151.
程 洪, 史智兴, 尹辉娟, 等. 基于机器视觉的多个玉米籽粒胚部特征检测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 145–151.
- 25 Cai Chunju, Fan Shaohui, Liu Feng, *et al.*. Physiological and biochemical changes of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) seeds in artificial aging[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(8): 29–34.
蔡春菊, 范少辉, 刘 凤, 等. 毛竹种子人工老化过程中生理生化变化[J]. *林业科学*, 2013, 49(8): 29–34.
- 26 Tan Meilian, Xiao Ningning, Yan Mingfang, *et al.*. Effects of sun flower artificial aging on seed vigor and physiological characteristics[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23): 12319–12322.
谭美莲, 校凝凝, 严明芳, 等. 人工老化对向日葵种子活力及生理特性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(23): 12319–12322.
- 27 Fu Yifeng, Li Hongyan, Huang Fan, *et al.*. Physiological and seed vigor changes of *Elymus sibiricus* L. seeds during artificial aging[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(6): 1360–1363.
付艺峰, 李鸿雁, 黄 帆, 等. 人工老化对老芒麦种子活力和生理生化变化的影响[J]. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(6): 1360–1363.

栏目编辑: 吴秀娟