doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.035

便携式多品种花生种子活力无损检测装置研究

尹田振[1,2] 彭彦昆[1,2] 李永玉[1,2] 胡黎明[1,2] 王炳伟[1,2] 马振浩[1,2]
（1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 国家农产品加工技术装备研发分中心，北京 100083）

摘要：开发了一种基于近红外光谱技术的便携式多品种花生种子活力无损检测装置。该装置以近红外光谱仪为核心，具有成本低廉、检测速度快等优势，可实现对多品种、多状态花生种子的高效非破坏性活力评估。研究发现，种子老化过程中，脂肪和水分等营养成分明显消耗，与种子活力呈显著关联性。为提高检测准确性，采用竞争自适应重加权抽样算法精确识别了水分和脂肪的特征波长，主要分布在1 000~1 150 nm、1 250~1 350 nm和1 400~1 500 nm。基于这些特征波段，建立水分和脂肪质量分数的定量预测模型。对于含水率，采用SNV预处理方法的模型在预测集上达到0.948 6的相关系数和0.292 7%的均方根误差。对于脂肪质量分数，使用SG-MSC预处理后获得了0.852 1的预测集相关系数和2.569 9%的均方根误差。在上述基础上，引入稀疏偏最小二乘判别分析建立了花生种子活力判别模型。结果表明，改进后的模型在所有状态种子的分类准确率均有显著提高。鲁花8号、粒粒红、落日红和小白沙分类准确率分别达到91.20%、90.80%、90.00%和90.00%。相比不考虑特征波长的建模分类准确率（小白沙，74.40%），改进后的分类方法提高15.60个百分点。特别地，当脂肪质量分数低于45%且含水率低于4%时，判定为非活性种子。本研究开发的无损检测装置为花生种子活力的快速、准确评估提供了创新方法，具有在种子质量控制、育种选择以及农业生产中广泛应用的潜力。

关键词：种子活力；无损检测；特征波长；稀疏偏最小二乘判别分析
中图分类号：S237 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0340-08

Design of Portable Non-destructive Device for Viability Assessment of Multiple Peanut Seed Varieties

YIN Tianzhen[1,2] PENG Yankun[1,2] LI Yongyu[1,2] HU Liming[1,2] WANG Bingwei[1,2] MA Zhenhao[1,2]
(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *National R&D Center for Agro-processing Equipment, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: A portable nondestructive testing device was developed based on near infrared spectroscopy technology, which was used to evaluate the viability of various peanut seeds. With a near-infrared spectrometer as its core component, the device offered advantages such as low cost and rapid detection, enabling efficient non-destructive viability assessment of peanut seeds across multiple varieties and states. It was found that during seed aging, nutritional components such as fat and moisture were significantly consumed, showing a strong correlation with seed viability. In order to improve detection accuracy, competitive adaptive re-weighted sampling (CARS) algorithm was used to accurately identify characteristic wavelengths of water and fat, which were mainly distributed in the ranges of 1 000~1 150 nm, 1 250~1 350 nm and 1 400~1 500 nm. On this basis, quantitative prediction models of moisture and fat content were established. For moisture content, the SNV pretreatment model achieved a high correlation coefficient of 0.948 6 and a low RMS of only 0.292 7% on the prediction set. For fat content, SG-MSC pretreatment still produced the correlation coefficient of prediction set of 0.852 1 and a root mean square error of 2.569 9. On this basis, the sparse partial least squares discriminant analysis (SPLS-DA) model was introduced to establish a peanut seed viability discriminant model. Results showed that the improved model significantly improved the classification accuracy for seeds under various conditions. The classification accuracies for Luhua No. 8, Lili Hong, Luori Hong, and Xiaobaisha varieties reached 91.20%, 90.80%, 90.00% and 90.00%, respectively, an average increase of 15.60 percentage points compared with

收稿日期：2024-07-12 修回日期：2024-09-05
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD1600101-06)
作者简介：尹田振(1998—)，男，博士生，主要从事农产品快速无损检测技术研究，E-mail: tzyin@cau.edu.cn
通信作者：彭彦昆(1960—)，男，教授，博士生导师，主要从事农产品无损检测技术与装备研究，E-mail: ypeng@ cau.edu.cn

models not considering characteristic wavelengths. Specifically, seeds were determined to be non-viable when fat content was less than 45% and moisture content was below 4%. This method was particularly helpful in distinguishing mildly aged seeds and low-viability seeds that are difficult to accurately identify through traditional spectral classification methods. A Matlab-based peanut seed detection software was developed to achieve " one-click operation " for rapid seed viability detection, providing users with a convenient testing experience. The non-destructive testing device developed provided a method for quickly and accurately evaluating peanut seed viability, and had a wide application potential in seed quality control, breeding selection and agricultural production.

Key words: seed viability; non-destructive detection; characteristic wavelengths; sparse partial least squares discriminant analysis

0　引言

花生作为重要的油料经济作物，出油率高达50%，在我国的油料作物生产和出口中占据着重要的地位。为了提升花生的产量和质量，高效制备和筛选高活力种子成为了关键环节。

花生种子的活力受多种因素影响，包括遗传特性、储藏条件、自身结构变化和发育程度等[1]。种子失活主要源于以下两大原因：其一，收获阶段的机械操作容易导致种子出现破碎和裂纹等机械损伤；其二，收获后的晾晒过程虽旨在去除种子中的自由水并将含水率降至13%以下以便储存，但操作不当可能导致含水率过高，从而在储藏阶段破坏种子休眠状态，影响其活力[2]。研究表明，随着种子老化时间的延长，其活力（萌芽率）显著下降，且储存环境不当也会引起种子霉变和早发芽等问题[3]。

因此，在种植前筛选出高质量种子，剔除低质量种子，对于提高作物产量具有重要意义[4]。然而，目前广泛应用的种子活力检测方法大多为破坏性检测，这意味着经检测的种子无法再用于正常培育和生产。常规的种子活力检测方法包括外观目测法、染色法、低温发芽测试、电导率测量、耐寒性测试、对照变质测试、希尔特测定、四唑测试、加速老化测试、复合逆境活力测试、标准发芽试验测定及幼苗生长测定等[5-8]。这些方法不仅耗时耗力，部分还涉及使用危险药剂，存在一定的安全隐患。而且这些方法检测周期长，难以满足快速检测的需求，不利于工业化生产的推进。而且在检测过程本身成本高昂，还可能因为破坏性检测而导致额外的损失，这使得无损检测在经济效益和实用性方面都具有显著优势[9-10]。

近年来，近红外光谱技术因其独特优势而备受关注。该技术通过测量样品在近红外区的光谱吸收或反射特性，可以获取与样品内部结构和成分相关的丰富信息。种子中含有大量的糖类、脂类和蛋白质等有机物，通过检测这些含碳物质的官能团特征吸收光谱，可以对种子组成进行定量分析，从而间接反映种子的活力水平[11]。

在这一领域，国内外学者已经开展了一系列富有成果的研究。例如，文献[12]基于自行研制的近红外光谱扫描仪，对玉米粒进行了光谱分析，成功建立了玉米粒水分、蛋白质、粗灰分和脂肪等成分的检测模型。其中，预测集相关系数分别达到0.76、0.89、0.72和0.83，相对分析误差分别为2.41、3.04、1.80和2.42。文献[13]的研究则探讨了将近红外光谱与多元分析结合用于松树种子活力快速分析的可能性，结果表明该方法能以100%的准确率区分未老化种子和老化种子。此外，文献[14]利用近红外光谱技术结合多种机器学习方法（如支持向量机、极限学习机、随机森林和自适应增强）检测小麦种子活力，最高准确率可达88.9%。

鉴于近红外光谱技术在种子活力检测领域展现出的巨大潜力，本文开发一种基于该技术的便携式、非破坏性花生种子活力检测装置。

1　便携式多品种花生种子活力无损检测装置设计

为实现花生种子活力的快速、无损检测，本研究设计了一套便携式多品种花生种子活力无损检测装置。该装置主要由硬件和软件两部分组成，其中硬件包括采集模块和控制与显示模块，软件则基于Visual Studio 2015开发，实现了光谱显示、数据显示、一键式检测和数据保存等功能。

1.1　硬件设计

1.1.1　检测模块

检测模块是整个装置核心，主要由光谱仪、光源和光纤3部分构成：

（1）光谱仪：采用滨松C14486GA微型光谱仪，其波长范围为980 ~1 800 nm。选择此波长范围的原因在于，相较于近红外的前波段，中后波段对种子内部的含氢基团具有更高的敏感度，有利于提高检测精度。

（2）光源：选用AvaLight-HAL-S-Mini型卤素灯光源，这是一种风冷型卤素灯光源，其输出功率可调节，为光谱采集提供稳定的光照条件。

（3）光纤：采用ZFQR400-7-VIS-NIR型分叉光纤（图1）。该光纤直径为200 μm，总长度30 cm，其中分叉两端各10 cm，合并端20 cm。b、c端为标准SMA905接

口，a端探头长度40 mm，直径6.35 mm，光程为350~2 500 nm，材质为PVC，芯径400 μm。这种设计能够有效地传输光源发出的光线并收集反射光谱。



图1 ZFQR400-7-VIS-NIR型分叉光纤示意图

Fig. 1 Schematic of bifurcated fiber ZFQR400-7-VIS-NIR

为确保光谱采集的稳定性和准确性，采集探头的设计尤为关键。探头不仅要能固定光纤，还要防止光谱采集过程中出现漏光现象。图2为采集探头示意图。这种检测探头采用圆柱形主体结构，中部设有类椭圆形槽用于样品放置或作为检测窗口。顶部配备黑色遮光罩以消除外界光干扰，底部设计有细径圆柱通道用于光纤布置。为防止漏光，应确保各连接处严密贴合，采用高质量遮光材料，并对光纤通道进行精确尺寸控制。建议在受控光环境下操作，并进行定期检查和维护，以保证检测结果准确性和可重复性。

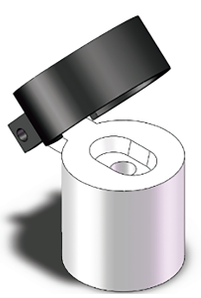

图2 采集探头示意图

Fig. 2 Schematic of acquisition probe

1.1.2 控制与显示模块

控制与显示模块是实现人机交互的重要部分，主要包括以下组件：

（1）微型计算机：采用英特尔赛扬处理器J4125微型计算机，配备8GB LPDDR4-2400内存，预装Windows 11操作系统。该计算机尺寸仅为138 mm×51 mm×13 mm，质量100 g。

（2）显示屏：选用Sinch HDMI Display-B，为操作者提供清晰的视觉界面。

（3）散热系统：配备直流12 V散热风扇，确保设备在长时间工作时保持稳定性能。

图3展示了整个检测装置的实物图，直观地呈现了各模块的集成效果。

1.2 软件设计

为了实现便捷的操作和数据处理，本研究基于Visual Studio 2015开发了配套软件。该软件具备以下主要功能：① 光谱显示：实时展示采集到的花生种子光谱数据。② 数据显示：以表格或图表形式展示处理后的数据结果。③ 一键式检测：单个种子采集时间为1 s，检测

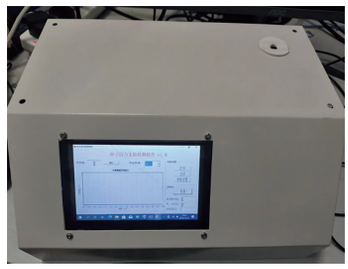

图3 便携式多品种花生种子活力无损检测装置实物图

Fig. 3 Portable multi-variety peanut seed viability nondestructive testing physical map

成本为零。④ 数据保存：自动保存检测结果，便于后续分析和追溯。

2 材料和方法

2.1 样品材料

选择4种优质花生种子品种：鲁花8号、粒粒红、落日红和小白沙（图4，由左至右分别为小白沙、粒粒红、落日红、鲁花8号）。所有选用的种子均无霉变、无缺陷，表面圆润光滑，外形饱满且近似一致，初始发芽率均超过99%。

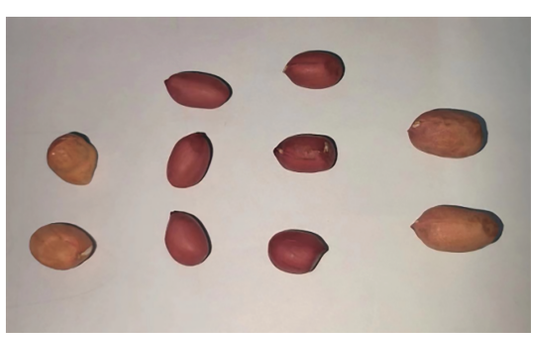

图4 4种品种花生

Fig. 4 Four peanut seeds

为了模拟不同活力状态的种子，在高活力种子的基础上，通过人工处理制备热损伤种子和老化种子：

（1）热损伤种子：采用微波炉低温失活处理法[15]。具体步骤为：将微波炉调至低火烘焙挡位，将适量种子放入微波炉中处理约30 s，取出冷却后重复上述步骤，共进行3次处理。这种方法对花生的外观结构没有造成显著变化，混入正常种子中不易分辨。

（2）老化种子：将种子置于高温高湿环境（相对湿度90%以上，温度40~45 ℃）中加速老化[16-17]。种子分为3组，分别对应老化1~2 d、3~5 d和6~10 d。老化处理后种子在培养完毕后置于室温（20 ℃）下24 h。

后续称无处理的种子为高活性种子。

最终，每个品种的花生种子包含5种不同状态：高活性种子、热损伤种子，以及人工老化1~2 d、3~5 d和6~10 d的种子。为了验证不同状态种子的活性是否一致，对花生种子进行活力测定。

2.2　花生种子活力测定

本研究严格遵循《农作物种子检验规程》进行花生种子活力测定。具体步骤如下：① 将花生种子按顺序放置于垫有两层滤纸的发芽盒中。② 加入适量蒸馏水，置于恒温恒湿种子培养箱中，温度维持在22~26 ℃。③ 每日观察并记录花生的发芽情况，适时补充水分。④ 总计萌发时间为7 d。

发芽标准：胚芽长度超过1 cm视为可发芽，否则视为不具备活性[18]。

2.3　种子内部化学成分分析方法

本研究主要对花生种子的水分和脂肪质量分数进行测定，使用的设备包括热风烘干箱和索氏脂肪提取器。具体分析方法为：① 脂肪质量分数测定：依据国家标准GB 5009.6-2016，采用索氏抽提法[19]。② 含水率测定：依据国家标准GB 5009.3-2016，采用直接干燥法[20]。

2.4　光谱采集及数据处理方法

本装置基于漫反射光谱原理检测花生种子活力。光谱反射率计算公式为

$$R = \frac{I_s - I_b}{I_w - I_b} \times 100\% \tag{1}$$

式中　R——光谱反射率，%

I_b——黑参考光谱反射强度，cd

I_w——白参考光谱反射强度，cd

I_s——样本光谱反射强度，cd

为提高预测结果准确性和可靠性，采用6种预处理方式对原始光谱进行校正：多元散射校正（Multiplicative scatter correction，MSC）、标准正态变量变换（Standard normal variate，SNV）、归一化（Normalize，Nor）、SG平滑结合标准正态能量变换（SG-SNV）、SG平滑结合多元散射校正（SG-MSC）和SG平滑结合归一化（SG-Nor）[21]。

模型性能评价指标包括：校正集相关系数R_C、校正均方根误差（Root mean square error of calibration，RMSEC）、预测集相关系数R_P和预测均方根误差（Root mean square error of prediction，RMSEP）。一般而言，R_C和R_P越高，RMSEC和RMSEP越低，表明模型性能越好。所有计算均在Matlab 2016a中完成[22]。

3　结果与分析

3.1　光谱采集及特征分析

使用便携式多品种花生种子活力无损检测装置进行光谱采集，图5展示了小白沙花生的典型光谱曲线。在1 120、1 200、1 320、1 450、1 650 nm附近可观察到明显的特征峰。这些特征峰反映了花生种子内部不同成分的光谱响应[23]。950 ~1100 nm波段与N—H键和O—H键伸缩振动的2级倍频相关，主要反映种子内部的蛋白质和淀粉成分。1 200 nm附近为C—H基的第2倍频吸收波长，与种子内部的碳水化合物和脂肪相关。1 300 ~1 420 nm波段与C—H键伸缩振动的2级倍频和组合频有关，代表了脂肪的特征峰；1 400~1 500 nm为O—H基和N—H基的第1倍频吸收波长，分别代表了水分和蛋白质的特征吸收峰[24-25]。

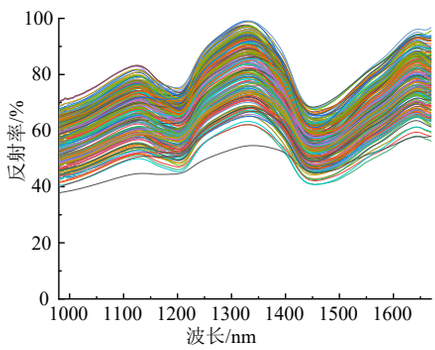

图5　小白沙花生光谱曲线

Fig. 5　Spectrum curves of Xiaobaisha peanut

3.2　种子发芽实验

图6展示了部分花生种子活力测定结果。第1排为高活性种子，第2排为老化1~2 d的花生种子，第3排为老化3~5 d的劣化种子，第4排为老化5 d以上和热损伤的劣化种子。实验结果表明，老化1~2 d的花生种子发芽困难，经过热损伤和人工老化3 d以上的种子明显不能发芽，其活性已经丧失。该种子发芽实验证明了不同状态的种子的活力不同。



图6　花生种子活力测定结果

Fig. 6　Results of seed viability determination of peanut seeds

3.3　种子活力分类模型

采用PLS-DA对光谱数据进行分类，结果如图7所示。分类结果表明，小白沙分类准确率为74.40%，其中人工老化的种子易产生判别混淆，而高活性种子和热损伤种子之间可以较好地区分。鲁花8号、粒粒红和落日红花生存在相似的判别情况。热损伤种子易于区分的原因可能是由于蛋白质高级结构发生变性，导致光谱特征显著变化。

为了探究老化种子判别混淆的目的，收集高活性种子和老化种子含水率和脂肪质量分数。图8和图9为高活性种子和老化种子含水率和脂肪质量分数分布。高活性种子样本含水率在3.5%~6.25%之间，主要集中在4%~5%区间；老化种子的含水率范围在2.2%~3.5%之间。高活性种子样本的脂肪质量分数在33%~58%之

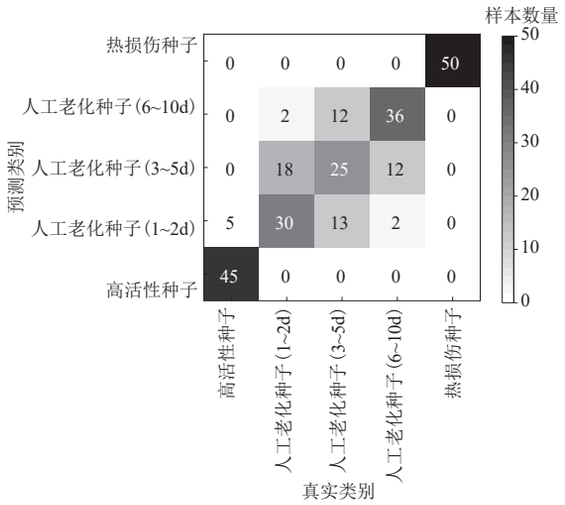

图7 小白沙种子分类预测集混淆矩阵

Fig. 7 Confusion matrix of Xiaobaisha seed classification prediction set

间,主要集中于45%~55%区间;人工老化种子的脂肪质量分数在35%~45%之间。

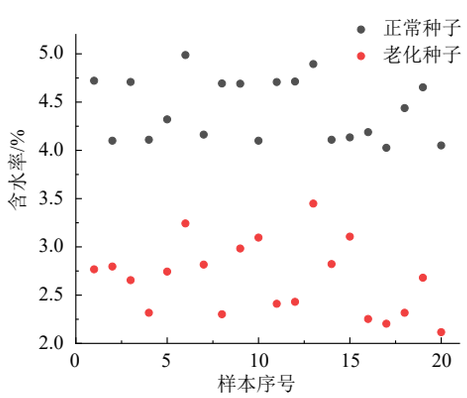

图8 老化种子与正常种子含水率对比

Fig. 8 Comparison of moisture content between aged seeds and normal seeds

研究发现,对于小白沙品种花生种子,当脂肪质量分数低于45%时,其发芽能力会显著降低,可能出现出芽短甚至霉变的情况。然而,只要含水率未低于4%,则不会影响到种子正常出芽。

在种子老化过程中,脂肪和水分等营养成分明显消耗,老化时间越长,种子发芽率越低。这表明种子内部成分与活力之间存在显著关联性,脂肪和含水率的降低直接反映了活力的下降。脂肪和含水率越低,活力越低。因此,轻度人工老化种子与低活性种子难以区分可能是因为储存或晾晒过程中的不当处理导致种子内部营养物质轻微消耗,但变化程度较小[26]。因此,精准预测种子内部脂肪和含水率对种子活性的判断具有关键的辅助作用。

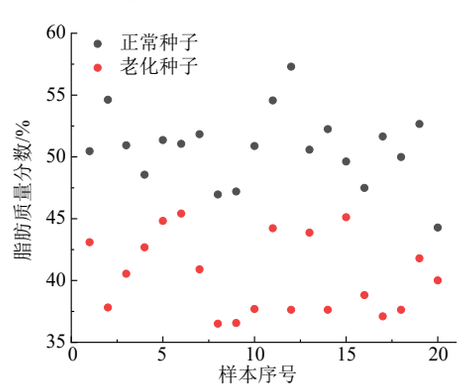

图9 老化种子与活性种子脂肪质量分数对比

Fig. 9 Comparison of fat content between aged seeds and active seeds

针对种子活力检测问题,重点关注与脂肪和水分相关的光谱波段权重显得尤为重要。通过建立准确的脂肪与水分预测模型,可以显著提高种子活力检测的准确率。这种方法特别有助于区分那些通过传统光谱分类方法难以准确识别的轻度老化种子和低活性种子,因为这些种子的内部营养物质可能仅发生轻微消耗,但足以影响其活力。

在开发种子活力检测模型时,应特别注重与脂肪和水分相关的光谱波段,如1 200 nm附近(与脂肪相关)和1 400~1 500 nm(与水分相关)的吸收峰。通过优化这些关键波段的权重,结合精确的脂肪和含水率预测模型,可以显著提高种子活力检测的准确性和可靠性,为快速、无损的种子质量评估提供更有力的技术支持[27]。

3.4 特征波长筛选及其对种子活力检测的影响

为提高种子活力检测的准确性,采用CARS算法对脂肪与含水率的特征波长进行筛选。通过50次蒙特卡洛采样,获得的特征波长如表1所示。

表1 种子脂肪和水分特征波长

Tab. 1 Characteristic wavelength of seed fat and moisture

参数	特征波长数	所选特征波长/nm
含水率	27	983;995;999;1 002;1 052;1 067;1 070;1 074;1 078;1 082;1 123;1 126;1 130;1 134;1 302;1 317;1 342;1 345;1 349;1 374;1 378;1 399;1 435;1 438;1 470;1 474;1 505
脂肪质量分数	20	983;1 018;1 025;1 078;1 130;1 138;1 277;1 280;1 284;1 388;1 427;1 431;1 470;1 484;1 488;1 509;1 575;1 582;1 610

分析结果表明,花生种子含水率和脂肪的特征波段分布范围较为相似,主要集中在1 000~1 150 nm、1 250~1 350 nm和1 400~1 500 nm区域。值得注意的是,水分的特征波段在1 000~1 150 nm和1 400~1 500 nm区域内偏向前端,而在1 250~1 350 nm区域内偏向后端;脂肪特征波段分布则恰好相反,这种差异性为精确区分含水率和脂肪质量分数提供了重要依据[28]。

使用特征波段与花生种子水分、脂肪的理化值进行建模,建模结果如表2所示。

实验结果显示,基于特征波段的水分和脂肪质量分数建模均取得了令人满意的效果,有力证明了所选特征波段的有效性。对于含水率,采用SNV预处理方法的模

表 2　基于特征波段的脂肪、水分建模结果

Tab. 2　Fat and moisture modeling results based on characteristic bands

参数	预处理	校正集		预测集	
		R_C	RMSEC/%	R_P	RMSEP/%
含水率	无	0.905 4	0.321 6	0.904 8	0.377 9
	SNV	0.950 1	0.267 3	0.948 6	0.292 7
	MSC	0.942 1	0.272 7	0.939 5	0.330 1
	Normalize	0.927 2	0.248 8	0.920 8	0.298 8
	SG-SNV	0.943 3	0.238 9	0.942 1	0.318 7
	SG-MSC	0.944 1	0.229 3	0.910 0	0.344 4
	SG-NOR	0.907 9	0.278 3	0.905 1	0.303 3
脂肪质量分数	无	0.791 4	2.370 1	0.791 0	2.795 8
	SNV	0.829 0	2.209 7	0.794 4	2.658 4
	MSC	0.836 2	2.167 1	0.819 5	2.653 1
	Normalize	0.819 0	2.266 9	0.802 1	2.600 6
	SG-SNV	0.813 9	2.253 8	0.800 2	3.134 4
	SG-MSC	0.859 8	1.878 4	0.852 1	2.569 9
	SG-NOR	0.805 0	2.344 0	0.797 3	2.606 0

型在预测集上达到0.948 6的相关系数和仅0.292 7%的均方根误差。脂肪质量分数建模虽然相对水分略逊，但使用SG-MSC预处理后仍获得0.852 1的预测集相关系数和2.569 9%的均方根误差，表现同样出色。这些结果验证了特征波长选择的准确性。

3.5　基于装置的种子活力分类模型建立

基于这些特征波段，构建了SPLS-DA分类模型，以提高种子内部成分中水分和脂肪质量分数对不同状态种子分类准确率。特别地，当脂肪质量分数低于45%且含水率低于4%时，判定为非活性种子。

SPLS-DA分类模型的分类结果如图10所示。结果显示，基于特征波段的SPLS-DA分类方法在各个品种上均优于传统分类方法（以小白沙为例）。在人工老化种子的不同阶段（1~2 d、3~5 d和6~10 d），改进方法明显优于传统方法。对于高活性种子，所有改进品种的分类正确率均达到100%，超过了传统方法（以小白沙为例）的90.00%。

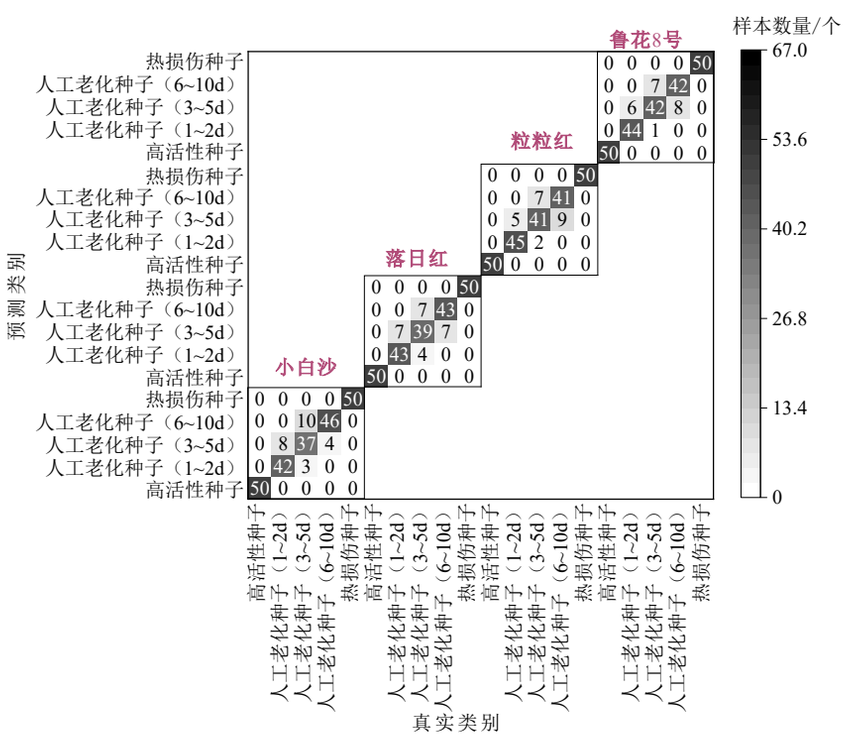

图10　花生种子的SPLS-DA验证集分类结果

Fig. 10　Classification results of SPLS-DA validation set for four peanut seeds

采用SPLS-DA分类模型的分类结果表明，4种花生品种（小白沙、落日红、粒粒红、鲁花8号）总分类准确率分别达到90.00%、90.00%、90.80%和91.20%。相比不考虑特征波长的建模分类准确率（小白沙，74.40%），改进后的分类方法提高15.60个百分点。

这些结果充分证明了聚焦于脂肪和水分相关的特征波段对提高种子活力检测准确性的重要性。通过精确识别和利用这些关键波段，不仅显著提高了分类准确率，还为快速、无损的种子活力评估提供了更可靠的技术支持。

3.6　基于装置的种子活力分类模型验证

图11展示了装置的验证集分类结果，模型验证结果显示与初始模型存在小于5%的波动，这主要是由于花生种子形状不规则导致近红外光束反射和散射不均匀，影响了光谱数据的准确性。因此，未来研究应着重改进探头设计，以更好地适应花生种子的形状特征，确保获得全面准确的光谱数据，从而进一步提高活力判断的准确性。

4　结论

（1）开发了一种基于近红外光谱技术的便携式多品

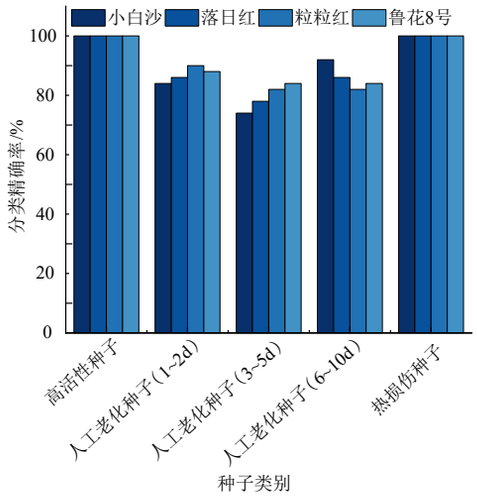

图11 4种花生种子验证集分类精确率

Fig. 11 Classification accuracy of SPLS-DA validation sets for four peanut seeds

种花生种子活力无损检测装置。该装置硬件包含采集模块和控制与显示模块，软件界面使用Visual Studio 2015开发，实现了光谱显示、数据显示、一键式检测和数据保存等功能。

（2）通过对花生种子的水分和脂肪质量分数分析，发现老化种子的水分和脂肪质量分数显著低于活力种子，老化时间越长，种子发芽率越低。精准识别出水分和脂肪的特征波长，并采用稀疏偏最小二乘（SPLS-DA）方法，显著提高了种子分类模型的整体准确率。4种花生种子（鲁花8号、粒粒红、落日红、小白沙）的总分类准确率分别达到91.20%、90.80%、90.00%和90.00%。相比不考虑特征波长的建模分类准确率（小白沙，74.40%），改进后的分类方法提高15.60个百分点。

（3）基于Matlab开发的花生种子检测软件实现了快速检测花生种子活力的“一键式操作”。用户可以输入被检花生种子的品种和状态，通过“检测”按钮自动分析光谱数据并输出种子活力预测结果。

参 考 文 献

[1] 赵永锋，监立强，贾晓艳，等. 玉米籽粒性状、品质性状和种子萌发特性的粒位效应[J]. 种子，2017，36(7)：82－84.
ZHAO Yongfeng，JIAN Liqiang，JIA Xiaoyan，et al. Effects of grain positionon kernel traits，quality traitsand seed germination characteristics of maize[J]. Seed，2017，36(7)：82－84.（in Chinese）

[2] 颜启传. 种子学[M]. 北京：中国农业出版社，2001.

[3] CHEN C，WANG R，DONG S，et al. Integrated proteome and lipidome analysis of naturally aged safflower seeds varying in vitality[J]. Plant Biology，2022，24(2)：266－277.

[4] 王成，郝楠，李月明. 种子活力的分子调控机制研究进展[J]. 园艺与种苗，2022，42(4)：83－85，92.
WANG Cheng，HAO Nan，LI Yueming .Research progress of molecular regulation of seed vigor[J]. Horticulture & Seed，2022，42(4)：83－85，92.（in Chinese）

[5] 张海艳. 热水老化处理对玉米种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学，2015，43(6)：96－97.

[6] 张海艳. 甲醇老化处理对玉米种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 玉米科学，2015，23(3)：76－79，85.

[7] 任少华，龙成昌，王陈，等. 香椿及其优质高产栽培技术探讨[J]. 现代园艺，2021，44(19)：72－74.

[8] 曹栋栋，吴伟，陈珊宇，等. 低温发芽测定早稻种子活力[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，2019，45(6)：657－666.
CAO Dongdong，WU Wei，CHEN Shanyu，et al. Seed vigor testing by low temperature germination in early rice[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)，2019，45(6)：657－666.（in Chinese）

[9] 杨冬凤，李爱传，刘金明，等. 耦合平均影响值-连续投影算法优化种子活力近红外检测模型[J]. 光谱学与光谱分析，2022，42(10)：3135－3142.
YANG Dongfeng，LI Aichuan，LIU Jinming，et al. Optimization of seed vigor near-infrared detection by coupling mean impact value with successive projection algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2022，42(10)：3135－3142.（in Chinese）

[10] 夏宇，孟静武，罗斌，等. 高光谱结合理化参数跨品种识别玉米种子贮藏年份[J]. 农业工程学报，2024，40(16)：261－268.
XIA Yu，MENG Jingwu，LUO Bin，et al. Cross species identification of maize seed storage year by hyperspectral combination of physicochemical parameters[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(16)：261－268.（in Chinese）

[11] 杨冬凤，尹淑欣，姜丽，等. 玉米种子活力近红外光谱智能检测方法研究[J]. 核农学报，2013，27(7)：957－961.
YANG Dongfeng，YIN Shuxin，JIANG Li ，et al. Research on maize vigor intelligent detection based on near infrared spectroscopy[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2013，27(7)：957－961.（in Chinese）

[12] TIGABU M，ODÉN P C. Rapid and non-destructive analysis of vigour of *Pinus patula seeds* using single seed near infrared transmittance spectra and multivariate analysis[J]. Seed Science and Technology，2004，32(2)：593－606.

[13] 沈广辉，刘贤，张月敬，等. 基于在线近红外光谱快速检测玉米籽粒主要品质参数的研究[J]. 中国畜牧杂志，2017，53(1)：105－109.

[14] AMBROSE A，KANDPAL L M，KIM M S，et al. High speed measurement of corn seed viability using hyperspectral imaging[J]. Infrared Physics & Technology，2016，75：173－179.

[15] 陈婧，李建平，李荣. 人工老化处理对糯玉米种子生理生化特性的影响[J]. 西北农业学报，2016，25(6)：857－862.
CHEN Jing，LI Jianping，LI Rong. Physiological and Biochemical characteristics of waxy maize seeds during artificial aging[J]. Acta

Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25(6): 857 - 862. (in Chinese)

[16] 高华伟, 满强, 潘晶, 等. 大豆人工老化与自然老化的种子活力差异研究[J]. 种子, 2015, 34(1): 14 - 18.
GAO Hua-wei, MAN Qiang, PAN Jing, et al. Differences in properties of seed vigor between artificially and naturally aged soybean seeds [J]. Seed, 2015, 34(1): 14 - 18. (in Chinese)

[17] 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.
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. (in Chinese)

[18] GRASSO R, GULINO M, GIUFFRIDA F, et al. Non-destructive evaluation of watermelon seeds germination by using delayed luminescence[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2018, 187: 126 - 130.

[19] 国家食品药品监督管理总局. 食品中脂肪的测定:GB 5009. 9—2016[S]. 北京: 中国标准出版社,2016.

[20] 国家食品药品监督管理总局. 食品中水分的测定:GB 5009. 9—2016[S]. 北京: 中国标准出版社,2016.

[21] 范宝磊, 张耀兮, 吴仲珍, 等. 不同品系油菜花粉生活力测定方法比较[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2596 - 2597.
FAN Baolei, ZHANG Yaoxi, WU Zhongzhen, et al. Comparison of different determination methods of the pollen vitality of different lines rape[J]. Journal of Anhui Agri. 2012, 40(5): 2596 - 2597. (in Chinese)

[22] YIN T, PENG Y, LI Y, et al. Tailored Au@Ag NPs for rapid ractopamine detection in pork: optimizing size for enhanced sers signals[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104082.

[23] WESTAD F, SCHMIDT A, KERMIT M. Incorporating chemical band-assignment in near infrared spectroscopy regression models[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2008, 16(3): 265 - 273.

[24] WILLIAMS P J, KUCHERYAVSKIY S. Classification of maize kernels using NIR hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 131 - 138.

[25] LIU D, SUN D W, ZENG X A. Recent advances in wavelength selection techniques for hyperspectral image processing in the food industry[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(2): 307 - 323.

[26] 王冬, 韩平, 吴静珠, 等. 近紫外-可见-短波近红外多光谱成像数据的糯玉米种子热损伤粒的无损快速鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(9): 2696 - 2702.
WANG Dong, HAN Ping, WU Jingzhu, et al. Non-destructive identification of the heat-damaged kernels of waxy corn seeds based on near-ultraviolet-visible-shortwave and near-infrared multi-spectral imaging data[J].Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(9): 2696 - 2702. (in Chinese)

[27] 彭彦昆, 霍道玉, 左杰文, 等. 便携式豆类品质监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 404 - 411.
PENG Yankun, HUO Daoyu, ZUO Jiewen, et al. Portable bean quality detecting device system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 404 - 411. (in Chinese)

[28] 彭彦昆, 戴宝琼, 李阳, 等. 玉米主要品质便携式检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 382 - 389.
PENG Yankun, DAI Baoqiong, LI Yang, et al. Design and experiment of portable device for testing main quality in corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 382 - 389.(in Chinese)