doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.063

插入式油菜籽叶绿素含量无损检测装置设计与实验

张悦湘[1,2]　李永玉[1,2]　彭彦昆[1,2]　王　威[1,2]　刘　杰[1,2]　孙禹琢[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中心, 北京 100083)

摘要: 油菜是我国第一大油料作物,生产中常采用联合收获机一次性收获,因此收获的油菜籽叶绿素含量差异较大,影响油品质量和油脂加工成本,油菜籽中的叶绿素含量现场实时检测在油菜籽收购、加工等环节中具有重要意义。以研发便携式、低成本油菜籽叶绿素无损快速检测装置为目的,根据油菜籽堆放储藏等特性,设计插入式检测探头,并研制了一种基于多光谱传感器的低成本油菜籽叶绿素无损检测装置。基于所研制检测装置建立了油菜籽叶绿素含量的偏最小二乘预测模型,经光谱形状特征(Spectral shape feature, SSF)和连续投影算法(Successive projections algorithm, SPA)预处理后预测模型决定系数和均方根误差分别为 0.941 4 和 2.026 1 mg/kg。同时,基于 Raspberry Pi 3B 和 QT5 开发工具,采用 C++语言开发了实时分析控制软件,实现了一键式人机交互控制。最后,选取 25 组未参与建模的油菜籽样品对装置检测精度和稳定性进行了外部验证,装置对每个样品重复检测 3 次叶绿素含量平均变异系数为 3.27%,装置预测值与实际理化值决定系数和均方根误差分别为 0.935 8 和 1.907 1 mg/kg。结果表明,插入式油菜籽叶绿素无损检测装置可以满足现场实时检测需求,为油菜籽加工产业化发展提供技术支撑。

关键词: 油菜籽; 叶绿素; 多光谱传感器; 无损检测; 插入式装置

中图分类号: S375　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0671-08　　**OSID**:

Design and Test of Insertable Non-destructive Testing Device for Chlorophyll Content of Rapeseeds

ZHANG Yuexiang[1,2]　LI Yongyu[1,2]　PENG Yankun[1,2]　WANG Wei[1,2]　LIU Jie[1,2]　SUN Yuzhuo[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *National Agricultural Products Processing Technology and Equipment R&D Center*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Rapeseed is the most important oil crop in China. In production practices, combined harvesters are commonly employed for one-time harvesting, resulting in significant variations in chlorophyll content among harvested rapeseeds. These variations adversely affect oil quality and increase processing costs, making real-time, on-site chlorophyll content detection crucial during rapeseed procurement and processing. To develop a portable, low-cost, and non-destructive rapid chlorophyll detection device for rapeseed, an insertion-type probe was specifically designed based on the storage characteristics of bulk rapeseed. A low-cost, non-destructive chlorophyll detection device was developed using a multispectral sensor. A partial least squares (PLS) prediction model for rapeseed chlorophyll content was established based on the developed device. After preprocessing with spectral shape feature (SSF) and successive projections algorithm (SPA), the model achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.941 4 and a root mean square error (RMSE) of 2.026 1 mg/kg. Additionally, a real-time analysis and control software was developed by using C++ on Raspberry Pi 3B with QT5, enabling one-click human-machine interaction. Finally, the accuracy and stability of the device were externally validated by using 25 rapeseed samples not involved in modeling. Each sample was measured three times, yielding an average coefficient of variation (CV) of 3.27% for chlorophyll content. The predicted values exhibited an R^2 of 0.935 8 and an RMSE of 1.907 1 mg/kg compared with that of reference

收稿日期: 2024-12-04　修回日期: 2025-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600101-06)

作者简介: 张悦湘(1999—),男,博士生,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究,E-mail: 18874067605@163.com

通信作者: 李永玉(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究,E-mail: yyli@cau.edu.cn

physicochemical measurements. The results demonstrated that the insertion-type non-destructive chlorophyll detection device met the requirements for on-site real-time detection, providing technical support for the industrialization of rapeseed processing.

Key words: rapeseed; chlorophyll; multispectral sensor; non-destructive detection; insertable device

0 引言

油菜是我国重要的油料作物[1-2]。菜籽油是国内自产的第一大食用植物油,产量占国产食用植物油的 47%[3-4],且富含多种营养物质[5-7]。由于油菜是无限花序作物,同一植株上的角果成熟度不一致,采用联合收获机一次性收获会同时收获青籽、黄籽、黑籽等不同成熟度的籽粒[8-9],未完熟的青、黄籽粒经晾晒、干燥后其外观颜色转为黑褐色,与完熟籽粒难以辨别。未完熟油菜籽叶绿素含量高,叶绿素作为一种光敏剂,能引发自由基反应,加快油脂的氧化酸败,极大缩短产品的货架期[10-11]。此外,叶绿素会使菜籽油呈墨绿色,影响油品质量,油菜籽中叶绿素含量直接关系到油脂生产加工过程中脱色脱臭工艺成本[12]。

目前,油菜籽中叶绿素含量主要检测方法为紫外可见分光光度法[13],该方法检测结果精确且稳定,但其操作步骤繁琐、耗时长、需要破坏样本,同时检测中使用的化学试剂具有一定污染性[14],无法满足收购、加工等环节的现场检测需要。为克服传统化学手段在油菜籽产销链中品质监测的局限性,国内外学者进行了油菜籽叶绿素快速检测方法的研究[15-16]。其中,可见/近红外技术以其灵敏度高、能快速反映油菜籽中叶绿素含量而在油菜籽品质评估方面得到迅速发展。诸多学者均基于市售的近红外光谱仪对油菜籽叶绿素含量快速检测方法进行了研究,但光谱仪体积较大、价格昂贵,且大部分成果仍处于实验室研究阶段,并不能满足油菜籽品质现场快速检测的高效性与便携性要求[17-19]。

针对油菜籽叶绿素含量的现场实时检测实际需求,本文研发便携式、低成本油菜籽叶绿素含量无损快速检测装置。根据油菜籽在收购、加工环节中堆放储藏等特性,设计插入式检测探头,通过对比分析实验确定光谱采集方式及光源功率等光谱采集参数,基于多光谱传感器研制低成本油菜籽叶绿素无损检测装置,编写实时检测分析控制软件,建立油菜籽叶绿素含量预测模型。

1 油菜籽叶绿素检测装置设计

1.1 工作原理

该装置主要由光谱采集模块、控制与显示模块、光源与供电模块及外围电路等核心部分构成,具体结构如图 1 所示。目前,黄豆、大米等籽粒类作物无损检测装置以手持式为主[20-21],通过样品杯盛取部分样品放入装置进行检测。油菜籽粒径小且尺寸较为均匀,叶绿素主要分布于油菜籽种皮,结合油菜籽收获干燥后通常堆垛或装袋储藏的特性[22],本研究设计插入式探头,将采集探头插入油菜籽堆中,透过油菜籽的光子通过聚焦准直透镜进入多光谱传感器,经由多光谱传感器将接收的可见/近红外光谱信号转换为数字信号传送至仪器内置的控制器,根据内部植入的预测模型得到叶绿素含量预测值后在屏幕上实时显示和保存检测结果。

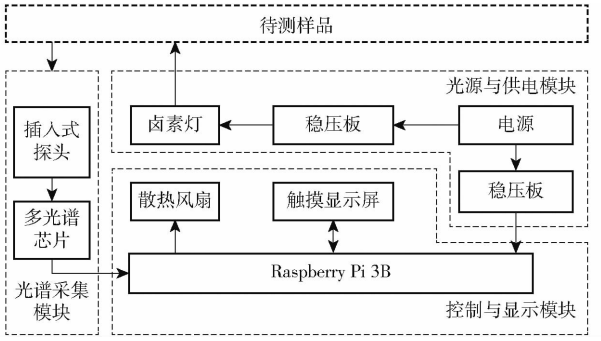


图 1 检测装置结构框图

Fig. 1 Structure diagram of detection device

1.2 硬件部分

1.2.1 插入式探头设计

常规圆筒形探头在插入采集时,油菜籽受探头内壁摩擦力和籽粒间相互作用力的影响形成“山堆状”,探头顶部空缺部分将影响光谱采集的稳定性,如图 2a 所示。本研究将探头内壁设为圆台形,外壁为圆柱形,并于顶部设置孔位便于后续安装,如图 2b 所示。当该探头向下插入油菜籽堆时,油菜籽受到圆台内壁的作用力被向内挤压至探头顶部的石英玻璃处,填满探头顶部的光谱采集面,提高了光子在籽粒间的透过率,获得更丰富的油菜籽光谱信息,如图 2c 所示。此外,圆柱形外壁使得探头无需多次施加压力便可轻松插入油菜籽堆。籽粒填充效果主要受探头圆台形内壁锥顶角影响,本研究设计了锥顶角为 0°、30°、60°、90°的 4 种探头进行对比实验。分别将不同锥顶角的探头插入油菜籽堆中 15 次,对比分析了探头内填充籽粒体积密度,结果如图 3 所示。探头内籽粒填充密度随探头锥顶角的增大而增加,当锥顶角达到 60°后,籽粒填充效果变化

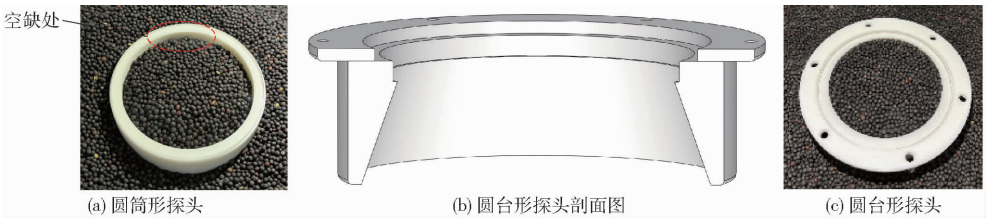


图 2　圆筒形探头和圆台形探头填充效果

Fig. 2　Filling effect of cylindrical probe and circular frustum probe

趋于稳定，结合装置便携性需求，将探头圆台形内壁锥顶角设为 60°。

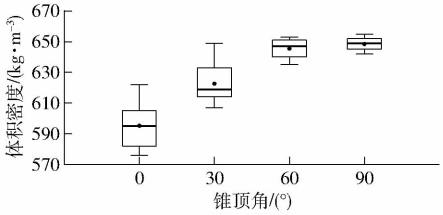


图 3　不同锥顶角探头中油菜籽的体积密度

Fig. 3　Volume density of rapeseeds in probes with different apex angles of frustum

1.2.2　光谱采集单元

选用多光谱传感器采集样本光谱信息。根据国内外基于可见/近红外光谱对叶绿素检测的研究[23-25]，选择有效波长范围为 410 ~ 940nm 的美国艾迈斯公司生产的 AS7265X 型多光谱传感器，该传感器包含了检测叶绿素的关键波段。多光谱传感器是一种低成本、性能可靠的光谱仪替代产品，虽然分辨率不及光谱仪，但是在实际应用方面却有着独特优势[26]。多光谱传感器体积较小，在设计检测装置时可以将芯片采集探头直接贴近油菜籽的表面，省去光纤的布置，使得检测装置体积进一步减小。同时，该多光谱传感器提供了串行通信控制接口，可通过微型控制器驱动，而传统光谱仪则依赖计算机等设备，增加了控制硬件体积和成本。

1.2.3　光源选择

卤素灯具有包含可见/近红外光波长范围(360 ~ 2 500 nm)、高亮度、输出稳定等特点，在可见/近红外光谱技术领域中具有广泛应用。当油菜籽表面的温度维持在 45℃ 以上，并且持续较长时间，叶绿素会因高温发生分解[13]，因此为保证检测准确性，需将光源温度控制在 45℃ 以下。本研究设计了油菜籽专用环形光源模块，如图 4 所示。卤素灯环形布置于灯座内部，灯座内壁的“抛物线”形结构和内表面的高光漆可将发射光聚拢，增大发射光的利用率。为使检测中油菜籽温度始终保持在 45℃ 以下，同时尽量获取较大光强，对不同功率光源进行了对比实验，结果如图 5 所示，最终选用 6 个 2.1 W 超高亮卤素灯作为装置光源。

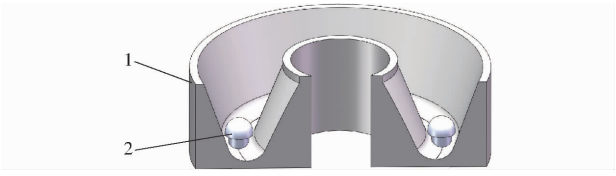


图 4　光源模块剖面示意图

Fig. 4　Sectional drawing of light source module

1. 灯座　2. 卤素灯珠

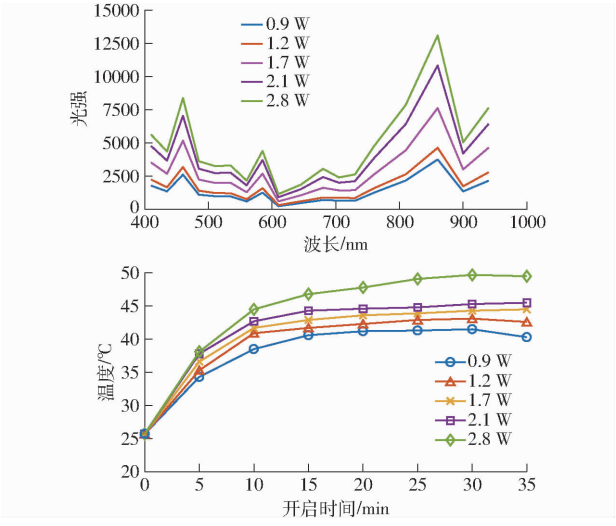


图 5　光源模块温度及光强对比

Fig. 5　Comparison charts of light source module temperature and light intensity

1.2.4　光谱采集方式对比

可见/近红外光谱采集方式主要有漫反射、漫透射和局部漫透射，这 3 种方式在不同的检测领域均有应用且获得了较为理想的检测结果[27-28]。漫反射是获取照射光进入样品内部再返回表面的光，携带了样品结构和组成成分信息，这种光通常反映样品浅层信息且光谱信号强度较大。与漫反射相比，漫透射光谱采集方式可以获得更加丰富的样品内部组成成分信息和结构信息，漫透射光信号强度与样品填充厚度和密度成反比，信号强度比漫反射低。与漫反射和漫透射相比，基于局部漫透射光谱采集方式获得的样品信息介于两者之间[29]。考虑到插入式检测装置需要将光源与光谱采集探头安装至同一侧，分别搭建了油菜籽漫反射光谱采集系统和油菜籽局部漫透射光谱采集系统，如图 6 所示，最终结合检测模型预测效果以及装置便携性等多种因素确

定油菜籽样品光谱采集方式。

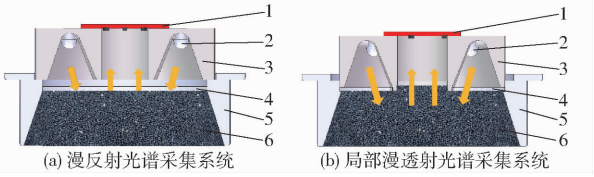


图 6 光谱采集模块剖面图

Fig. 6 Sectional drawing of spectrum acquisition module

1. 多光谱传感器 2. 卤素灯珠 3. 灯座 4. 石英玻璃 5. 插入式探头 6. 油菜籽

基于油菜籽漫反射与局部漫透射光谱采集系统分别采集不同成熟度油菜籽样品 60 组,获取的光谱信息如图 7 所示。结合油菜籽样品光谱信息和标准理化值分别建立了叶绿素含量(质量比)预测模型,结果如表 1 所示。基于局部漫透射光谱采集系统获取的光谱曲线具有更丰富的波峰和波谷,能更好地反映油菜籽的内部品质信息,且基于该系统所建预测模型具有更低的均方根误差,因此本研究确定局部漫透射为油菜籽样品的光谱采集方式。

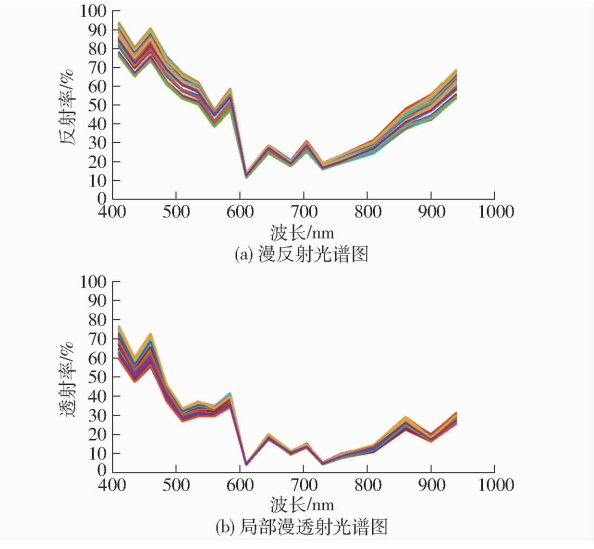


图 7 油菜籽漫反射及局部漫透射光谱图

Fig. 7 Diffuse reflection and localized diffuse transmission spectra of rapeseed

表 1 漫反射与局部漫透射采集系统建模结果

Tab. 1 Diffuse reflection and local diffuse transmission acquisition system modelling results

光谱采集系统	校正集		预测集	
	R_C^2	校正集均方根误差/(mg·kg^{-1})	R_P^2	预测集均方根误差/(mg·kg^{-1})
漫反射	0.902 8	2.441 9	0.870 9	2.668 1
局部漫透射	0.918 8	1.748 6	0.867 0	2.466 5

1.2.5 控制与显示模块

为满足现场检测的功能需求,选择 Raspberry Pi 3B 嵌入式开发板作为检测装置的微控制器。在光谱信息传输方面,该微控制器具备丰富的外设接口,如 GPIO、USB 2.0 等常用接口,可实现与多光谱传感器通信,并将光谱数据发送至上位机。在数据显示方面,微控制器通过自身引脚与 3.5 inch TFT - LCD 电阻式触摸显示屏连接,实现信息显示和人机交互,按下检测按键后,装置自动采集油菜籽样本光谱信息并显示叶绿素含量预测值。

1.2.6 整机设计

在保证装置各模块正常运行的条件下,充分利用装置内部空间,以减小整机的外观尺寸与质量,并对装置外壳接缝及手持位置进行了圆角处理,便于作业人员的手持操作,提高了设备的人机交互性和便携性。同时,在装置内配有稳压模块和散热风扇,以保证装置的正常运行和长期稳定。装置总功耗约为 16 W,采用容量为 6 000 mA·h 的锂电池可满足装置在预热后持续工作 3 h 以上。检测装置整体尺寸为 210 mm × 75 mm × 155 mm,质量为 690 g。装置整机结构如图 8 所示。

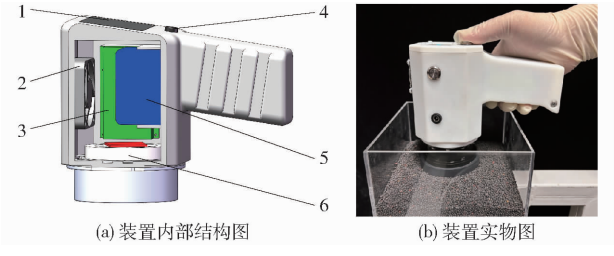


图 8 检测装置

Fig. 8 Detection device

1. 显示屏 2. 散热风扇 3. Raspberry Pi 3B 4. 检测按键 5. 锂电池 6. 光谱采集模块

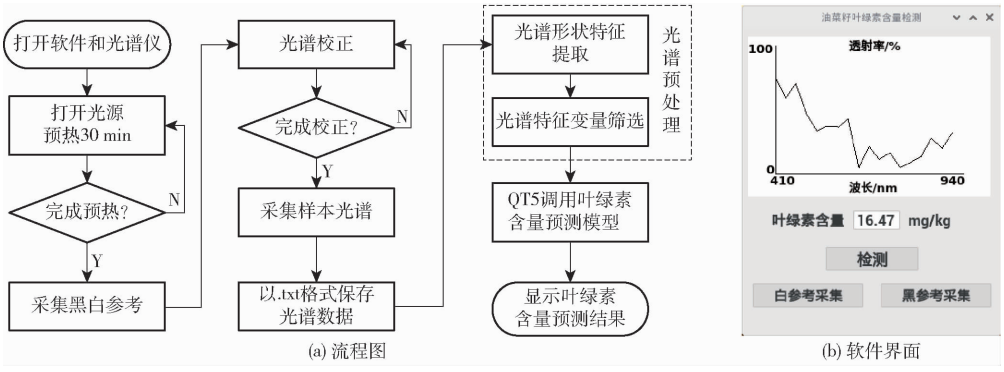
1.3 检测装置软件开发

为实现装置实时分析控制,使用 C + + 语言,结合 Raspberry Pi 3B 和 QT5 开发了油菜籽叶绿素检测软件。该软件具备一键式光谱采集、实时检测、结果显示与保存等功能,软件具体流程如图 9a 所示。该检测装置通过调用多光谱传感器驱动,采集黑白参考曲线进行光谱自检和校正。校正完成后,通过内置油菜籽叶绿素含量偏最小二乘预测模型对油菜籽样品实时光谱数据进行分析,并于显示屏上显示样品的叶绿素含量,软件界面如图 9b 所示。

2 油菜籽叶绿素含量预测模型建立

2.1 实验材料

选用湖北省广泛种植的“华油杂 62”、“大地 199”、“圣缘 2 号”3 个品种油菜籽除杂后作为实验样品,样品在 45℃ 条件下干燥 12 h,使其含水率降至 10% 以下。为获得不同叶绿素含量的油菜籽样



(a) 流程图　　(b) 软件界面

图 9　检测软件流程及检测界面

Fig. 9　Detection software flowchart and inspection interface diagram

本,参照文献[30]中油菜籽分级标准,向 3 个品种完熟的油菜籽中掺入 0 ~ 15% 未完熟的“华油杂 62”油菜籽,每个品种制备 55 组样本,每组样本为 20 g,共制备了不同叶绿素含量梯度的油菜籽样本 165 组。制备的油菜籽样本于 4℃冷藏保存,在实验前将样本从冰箱中取出编号排序,并在室温(20℃)环境中放置 24 h。

2.2　实验方法

2.2.1　光谱采集

光谱采集前开启光源预热 30 min,以获得强度稳定的发射光。通过聚四氟乙烯材质白板获取黑白参考曲线,用于油菜籽样品光谱数据的归一化校正。将每组油菜籽样本置于量杯中,再将装置检测探头插入油菜籽堆中获取样本光谱信息,同一样本连续采集 3 次光谱信息取平均值作为该组油菜籽样本原始光谱。

2.2.2　标准理化值测定

参照文献[13]中的分光光度法,每组油菜籽样品平行测定 3 次取平均值作为该组油菜籽样本叶绿素含量标准理化值。

2.2.3　样本集划分

基于 SPXY(Sample set partitioning based on joint X - Y distances)算法将 165 组油菜样品划分为 125 组校正集和 40 组预测集,校正集油菜籽叶绿素含量为 2.489 0 ~ 37.081 0 mg/kg,预测集油菜籽叶绿素含量为 2.820 1 ~ 34.571 7 mg/kg。

2.3　油菜籽叶绿素含量预测模型建立

基于插入式油菜籽叶绿素无损检测装置采集了油菜籽样品局部漫透射原始光谱,如图 10 所示,分别使用标准正态变换(Standard normal variable transform, SNV)、一阶导数(First derivative, FD)、光谱形状特征(SSF)算法进行预处理[31-33]。

选择光谱比(Spectral ratio, SR)、光谱差(Spectral difference, SD)和归一化光谱强度差(Normalized spectral intensity difference, NSID)3 种

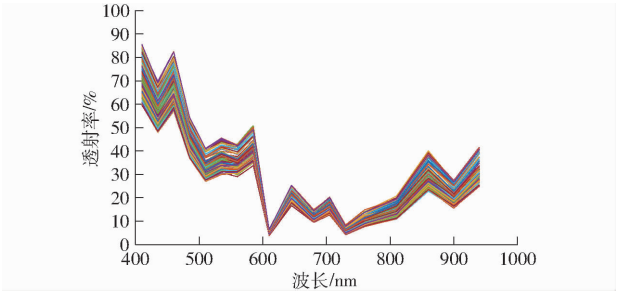


图 10　油菜籽光谱图

Fig. 10　Spectral of rapeseed

光谱形状特征提取方法对多光谱数据进行了预处理。SR 是指两个光谱强度比值,是某些特定成分分析的有效参数;SD 是指两个波长光谱强度差值,被用来反映光谱吸收峰深度;NSID 可用于消除光谱信息中加法和乘法系数引起的效应。具体公式为

$$R_{SR} = \frac{R_i}{R_j} \tag{1}$$

$$R_{SD} = R_i - R_j \tag{2}$$

$$R_{NSID} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \tag{3}$$

式中　R_i——第 i 个波长反射率

R_j——第 j 个波长反射率

R_{SR}——光谱比

R_{SD}——光谱差

R_{NSID}——归一化光谱强度差

经不同预处理的光谱,根据最小交叉验证集均方根误差选取最佳潜在变量数,建立油菜籽叶绿素含量的偏最小二乘回归模型,基于最佳潜在变量数建立的油菜籽叶绿素含量预测模型如表 2 所示。基于原始多光谱所建模型预测集决定系数 R_p^2 和预测集均方根误差(Root mean square error of prediction set,RMSEP)分别为 0.911 9 和 2.748 1 mg/kg。经 SNV 和 FD 处理后,模型性能并未得到有效提升,可能是由于 SNV 和 FD 算法更适用于连续光谱的处理。与原始光谱所建模型相比,基于多光谱形状特

征变量建立的模型效果明显提升。其中,基于 NSID 预处理后的模型 R_P^2 和 RMSEP 分别为 0.934 1 和 2.422 7 mg/kg。将 3 种光谱形状特征变量组合后,模型性能进一步提升,校正集决定系数 R_C^2 和校正集均方根误差(Root mean square error of correction set, RMSEC)分别为 0.941 2 和 1.840 6 mg/kg,R_P^2 和 RMSEP 分别为 0.940 7 和 2.221 9 mg/kg,但是模型预测集均方根误差仍然较高,且预测集与校正集均方根误差相差较大,这可能是因为 3 个光谱形状特征算法组合使用产生了干扰变量,降低了模型预测精度和稳定性。为消除组合模型中的干扰变量,通过连续投影算法(SPA)筛选与油菜籽叶绿素含量相关的特征变量。经 SPA 筛选的特征变量所建预测模型 R_C^2 和 RMSEC 分别为 0.942 5 和 1.820 1 mg/kg,R_P^2 和 RMSEP 分别为 0.941 4 和 2.026 1 mg/kg,模型散点图如图 11 所示。结果显示,油菜籽样本能够覆盖样本空间,所建立的模型具有较好的泛化能力。

表 2 不同预处理方法的叶绿素含量预测模型结果

Tab. 2 Chlorophyll content prediction model results for different pre-processing methods

预处理方法	校正集		预测集	
	R_C^2	校正集均方根误差/(mg·kg^{-1})	R_P^2	预测集均方根误差/(mg·kg^{-1})
无	0.937 4	1.962 0	0.911 9	2.748 1
SNV	0.897 7	2.502 8	0.842 8	3.481 3
FD	0.927 8	2.061 6	0.903 6	2.421 3
SD	0.932 9	1.987 7	0.925 0	2.712 3
SR	0.947 4	1.747 5	0.936 4	2.645 8
NSID	0.948 8	1.774 4	0.934 1	2.422 7
SD + SR + NSID	0.941 2	1.840 6	0.940 7	2.221 9
SPA(SD + SR + NSID)	0.942 5	1.820 1	0.941 4	2.026 1

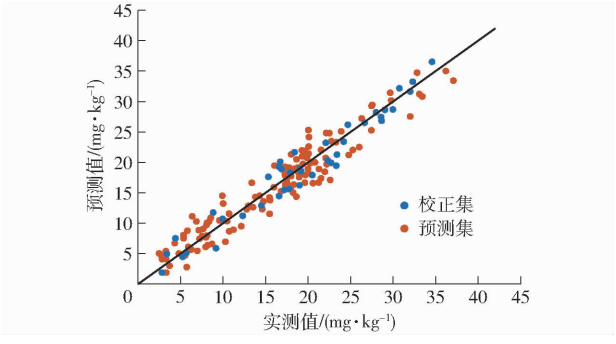


图 11 模型结果散点图

Fig. 11 Scatterplot of model results

3 装置实验验证

选取 25 组未参与建模的油菜籽样本,对插入式油菜籽叶绿素无损检测装置进行检测精度和稳定性验证。每组油菜籽样本分别重复检测 3 次,通过 3 次叶绿素含量预测结果的变异系数来评估装置的检测稳定性,预测结果变异系数如图 12a 所示,装置检测结果平均变异系数为 3.27%。25 组油菜籽样本叶绿素含量外部验证结果如图 12b 所示,叶绿素含量预测值与标准理化测定值 R^2 为 0.935 8,均方根误差为 1.907 1 mg/kg。结果表明,所研制的插入式油菜籽叶绿素无损检测装置的稳定性与检测精度均满足现场实时检测需求。

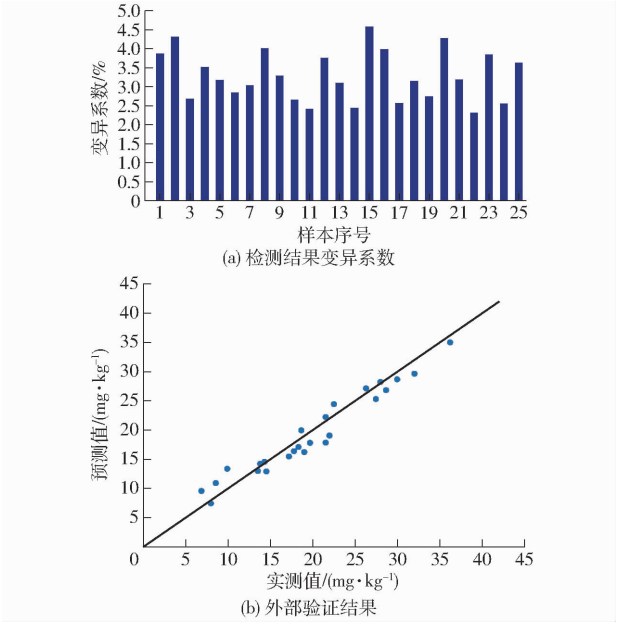


图 12 装置检测结果变异系数及外部验证结果散点图

Fig. 12 Scatter plot of coefficient of variation for device detection results and external validation results

4 结论

(1)研制了基于可见/近红外多光谱的插入式油菜籽叶绿素无损检测装置。根据油菜籽叶绿素光学、物理特性,设计了插入式检测探头,利用多光谱传感器研制了低成本油菜籽叶绿素检测装置。该装置主要由光谱采集模块、控制与显示模块、光源与供电模块及外围电路等核心部分构成,检测装置整体尺寸为 210 mm × 75 mm × 155 mm,质量为 690 g。

(2)建立了基于光谱形状特征算法的油菜籽叶绿素含量预测模型。基于插入式油菜籽叶绿素无损检测装置采集 165 组油菜籽样品的局部漫透射原始光谱,并结合 SSF 和 SPA 算法建立了叶绿素含量偏最小二乘预测模型,模型 R_P^2 和 RMSEP 分别为 0.941 4 和 2.026 1 mg/kg。

(3)开发了油菜籽叶绿素的实时检测分析控制软件。为实现装置的人机交互功能,使用 C + + 语言,结合 Raspberry Pi 3B 和 QT5 开发了油菜籽叶绿素检测软件。该检测软件具备一键式光谱采集、实

时检测、结果显示与保存等功能。

(4)实验验证了研制的插入式油菜籽叶绿素无损检测装置检测精度和稳定性。选取 25 组未参与建模的油菜籽样本进行了外部验证,装置对每个样本重复检测 3 次叶绿素含量平均变异系数为 3.27%,装置预测值与实际标准理化值 R^2 为 0.935 8,均方根误差为 1.907 1 mg/kg。结果表明,所研制的插入式油菜籽叶绿素无损检测装置可以满足现场实时、无损、快速检测需求,为油菜籽品质快速监测提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 李加纳,卢坤,荐红举,等. 油菜收获指数研究进展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):640 - 648.
LI Jiana, LU Kun, JIAN Hongju, et al. Research advances on harvest index of *Brassica napus* L. [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018,40(5):640 - 648. (in Chinese)

[2] 程沅孜,李谷成,李欠男. 中国油菜生产空间布局演变及其影响因素分析[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版),2016,17(2):9 - 15.
CHENG Yuanzi, LI Gucheng, LI Qiannan. Analysis of spatial distribution evolution and determinants of rapeseed production in China[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences), 2016, 17(2):9 - 15. (in Chinese)

[3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[4] 李勤,刘小焱,盛紫微,等. 我国油菜适合机械化收获关键农艺性状研究进展[J]. 中国油料作物学报,2023,45(5):1053 - 1061.
LI Qin, LIU Xiaoyan, SHENG Ziwei, et al. Research progress on target agronomic traits for mechanized harvesting of rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023,45(5):1053 - 1061. (in Chinese)

[5] SONOBE R, HIRONO Y, OI A. Non-destructive detection of tea leaf chlorophyll content using hyperspectral reflectance and machine learning algorithms[J]. Plants, 2020, 9(3):368.

[6] KAKAEI M, KAHRIZI D. Study of seed proteins pattern of brassica napus varieties via sodium dodecyl sulfate polyacrylamid gel electrophoresis[J]. International Research Journal of Biotechnology, 2011, 2(1): 26 - 28.

[7] KAHRIZI D. Reduction of EPSP synthase in transgenic wild turnip (*Brassica rapa*) weed via suppression of *aro*A [J]. Molecular Biology Reports, 2014, 41(12):8177 - 8184.

[8] 张敏,钟志堂,金梅,等. 江苏省油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报,2021,42(8):209 - 213,236.
ZHANG Min, ZHONG Zhitang, JIN Mei, et al. Current status and problems of rapeseed production in Jiangsu Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(8):209 - 213,236. (in Chinese)

[9] 马霓,李云昌,胡琼,等. 我国南方冬油菜机械化生产农艺研究进展[J]. 中国油料作物学报,2010,32(3):451 - 456.
MA Ni, LI Yunchang, HU Qiong, et al. Research of agronomic techniques for mechanical production of winter rape (*Brassica napus* L.) in south China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010,32(3):451 - 456. (in Chinese)

[10] SHAHADATI-MOGHADDAM Z, KAHRIZI D, KAZEMI E. Genetic characterization and molecular mapping of novel chlorophyll deficiency gene in air-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. Genetika, 2017, 49(1):77 - 86.

[11] ISMAEL D J M V, CORDEIRO R A M, ALMEIDA G M D, et al. Growth and visual symptoms of nutrients deficiency in Mangosteens (*Garcinia mangostana* L.)[J]. American Journal of Plant Sciences, 2018, 9(5):15.

[12] KHATTAB R, GOLDBERG E, LIN L, et al. Quantitative analysis and free-radical-scavenging activity of chlorophyll, phytic acid, and condensed tannins in canola[J]. Food Chemistry, 2010, 122(4):1266 - 1272.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 22182—2008:油菜籽叶绿素含量测定 分光光度计法[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

[14] 孙远明,黄丽,潘科,等. 测定克喘素免疫偶合物分子结合摩尔比的紫外-可见分光光度法[J]. 分析测试学报,2002,21(4): 41 - 44.
SUN Yuanming, HUANG Li, PAN Ke, et al. Determining the molecular coupling ratio of clenbuterol immunoconjugates by ultraviolet-visible spectrophotometry[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2002,21(4): 41 - 44. (in Chinese)

[15] OBLATH E A, ISBELL T A, BERHOW M A, et al. Development of near-infrared spectroscopy calibrations to measure quality characteristics in intact *Brassicaceae germplasm*[J]. Industrial Crops & Products, 2016, 89:52 - 58.

[16] BARTHET V J, PETRYK M W P, SIEMENS B. Rapid nondestructive analysis of intact canola seeds using a handheld near - infrared spectrometer[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(6):577 - 589.

[17] TANG H, LIAO G. The rapid detection method of chlorophyll content in rapeseed based on hyperspectral technology[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2021, 45(4):465 - 474.

[18] 李雪,杨瑞楠,原喆,等. 油菜籽叶绿素含量近红外光谱快速检测[J]. 中国油料作物学报,2019,41(1):126 - 129.
LI Xue, YANG Ruinan, YUAN Zhe, et al. Rapid detection of chlorophyll content in rapeseed based on near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019,41(1):126 - 129. (in Chinese)

[19] 陈蛋,陈斌,陆道礼,等. 近红外光谱分析法测定菜籽油中芥酸的含量[J]. 农业工程学报,2007,23(1):234 - 237.
CHEN Dan, CHEN Bin, LU Daoli, et al. Determination of the erucic acid content in rapeseed oil by near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(1):234 - 237. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 彭望,王前,廖庆喜,等. 基于近红外光谱的便携式油菜籽品质检测装置研制[J]. 农业工程学报,2024,40(18):13 – 22.
PENG Wang, WANG Qian, LIAO Qingxi, et al. Development of the portable device for rapeseed quality detection based on near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(18): 13 – 22. (in Chinese)

[22] 幸胜平,付晓记,付江凡,等. 不同包装材料和密闭储藏处理对油菜籽品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2019,45(13):166 – 170.
XING Shengping, FU Xiaoji, FU Jiangfan, et al. Effects of different packaging materials and airtight storage on storage quality of rapeseeds[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(13): 166 – 170. (in Chinese)

[23] LIU J, HAN J, CHEN X, et al. Nondestructive detection of rape leaf chlorophyll level based on Vis – NIR spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 222: 117202.

[24] 杨彪,杜荣宇,杨玉,等. 便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(12):180 – 186.
YANG Biao, DU Rongyu, YANG Yu, et al. Design of portable nondestructive detector for chlorophyll content of plant leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 180 – 186. (in Chinese)

[25] 唐伟杰,王楠,刘国辉,等. 基于光环境校正的便携作物叶绿素检测仪设计[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):249 – 256.
TANG Weijie, WANG Nan, LIU Guohui, et al. Design of portable crop chlorophyll detector with ambient light correction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 249 – 256. (in Chinese)

[26] ZHAO X, PENG Y, LI Y, et al. A flight sensing detector for apple maturity indexes in orchard[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 470 – 479.

[27] LOHUMI S, LEE S, LEE H, et al. A review of vibrational spectroscopic techniques for the detection of food authenticity and adulteration[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(1): 85 – 89.

[28] PASQUINI C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical appplications[J]. Journal of Brazil Chemistry Society, 2003, 14(2): 198 – 219.

[29] 刘亚超,李永玉,彭彦昆,等. 便携式大米多品质参数无损检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(8):351 – 357.
LIU Yachao, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Portable rapid nondestructive detecting instrument for multi-quality parameters of rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 351 – 357. (in Chinese)

[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 11762—2006:油菜籽[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[31] HAN Donghai, TU Runlin, LU Chao, et al. Nondestructive detection of brown core in the Chinese pear 'Yali' by transmission visible-NIR spectroscopy[J]. Food Control, 2006, 17(8): 604 – 608.

[32] ROBERTO M, HAFF R P, AERNOUTS B, et al. Feasibility of Vis/NIR spectroscopy for detection of flaws in hazelnut kernels [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(1): 1 – 7.

[33] ZHANG Mengsheng, SHEN Maosheng, PU Yuge, et al. Rapid identification of apple maturity based on multispectral sensor combined with spectral shape features[J]. Horticulturae, 2022, 8(5): 361.

(上接第 661 页)

[34] ZHANG X, JIA F, LUO S, et al. A marker-based watershed method for X-ray image segmentation[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2014, 113(3): 894 – 903.

[35] WANG G, LI Z, WENG G, et al. An optimized denoised bias correction model with local pre-fitting function for weak boundary image segmentation[J]. Signal Processing, 2024, 220: 109448.

[36] LI P, SHAO S. Can X-ray computed tomography (CT) be used to determine the pore-size distribution of intact loess? [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(1): 29.

[37] BACQ-LABREUIL A, CRAWFORD J, MOONEY S J, et al. Phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.) affects soil structure differently depending on soil texture[J]. Plant and Soil, 2019, 441(1 – 2): 543 – 554.

[38] FU Y, TIAN Z, AMOOZEGAR A, et al. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 193: 114 – 121.

[39] KIM H, ANDERSON S H, MOTAVALLI P P, et al. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field[J]. Geoderma, 2010, 160(2): 244 – 251.

[40] HU F, LI S, XU C, et al. Effect of soil particle interaction forces in a clay-rich soil on aggregate breakdown and particle aggregation[J]. European Journal of Soil Science, 2018, 70(2): 268 – 277.

[41] BROGOWSKI Z, KWASOWSKI W, MADYNIAK R. Calculating particle density, bulk density, and total porosity of soil based on its texture[J]. Soil Science Annual, 2014, 65(4): 139 – 149.

[42] MOHAMMADZADEH-HABILI J, HEIDARPOUR M, KHALILI D. Effect of aggregate size and porosity of clay soils on the hydraulic parameters of the Green-ampt infiltration model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(3): 06018001.