doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.032

面向炭化产线的秸秆原料成分检测模块设计

潘宇轩[1,2] 李福朋[1,2] 姜含露[1,2] 朱志强[1,2] 吕程序[1,2] 吴金灿[1,2] 周海燕[1,2]
（1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083）

摘要： 秸秆作为我国最主要的农林废弃物，是制备生物炭的主要原料，秸秆原料的固定碳、挥发分、灰分含量是影响成炭品质的关键指标，也是炭化热解工艺参数的调控依据。针对当前秸秆炭化产线上对秸秆固定碳、挥发分、灰分成分含量的快速检测需求，设计了一种秸秆原料成分检测模块。首先基于近红外光谱技术开展秸秆炭化成分检测方法的研究，基于在线检测需求选择便携式光谱传感器并设计漫反射检测光路，搭建面向产线的光谱采集单元，采集粗切秸秆在1 100~2 500 nm范围内的漫反射光谱，结合Savitzky-Golay卷积平滑（SG）、多元散射校正（MSC）、标准正态变换（SNV）预处理方法和偏最小二乘法（PLS），分别建立了基于全波长和基于竞争性自适应重加权法（CARS）筛选的特征波长的秸秆固定碳、挥发分、灰分含量预测模型，结果表明特征波长的建模效果优于全波长，对固定碳、挥发分、灰分质量分数预测的最优模型分别为SG+MSC-CARS-PLS、SG-CARS-PLS、SG+MSC-CARS-PLS，测试集决定系数R^2分别为0.891 6、0.931 7、0.929 7，预测集均方根误差分别为1.46%、1.39%、0.42%，相对分析误差分别为2.54、3.44、3.18，能够实现精确预测。然后进行秸秆成分在线检测模块设计，模块分为光谱采集单元、供电单元、控制与传输单元，嵌入已构建的秸秆成分预测模型，基于Raspberry Pi 4B开发板和其自带的Wi-Fi模块实现秸秆在线光谱采集、模型计算、数据传输等功能，通过样机试验证明该模块设计及开窗位置选择可以采集满足在线分析要求的近红外光谱曲线，同时采用斜率/截距校正的方法，将实验室模型转移到产线进行在线应用，固定碳、挥发分、灰分含量预测精度均得到提升，可以达到在线分析需求，为热解工艺参数的调控提供数据支撑。

关键词： 秸秆；炭化产线；在线检测；近红外光谱
中图分类号： S24 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-1298(2024)S2-0310-09

Design of Straw Raw Material Component Detection Module for Carbonization Production Line

PAN Yuxuan[1,2] LI Fupeng[1,2] JIANG Hanlu[1,2] ZHU Zhiqiang[1,2] LÜ Chengxu[1,2] WU Jincan[1,2] ZHOU Haiyan[1,2]
（1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*）

Abstract: Straw, as the primary agricultural waste in China, is the main material for biochar production. The fixed carbon, volatile matter, and ash content are key indicators that influence biochar quality and guide the parameters of pyrolysis processes. Aiming to address the need for rapid detection of these indicators in straw carbonization production lines by designing a straw composition detection module. Utilizing near-infrared spectroscopy, a method for detecting straw components was developed. A portable spectral sensor was selected and a diffuse reflectance detection path was designed. A spectral collection unit was established to capture spectra of coarse-cut straw in the 1 100~2 500 nm range. By applying Savitzky-Golay convolution smoothing (SG), multiple scattering correction (MSC), standard normal variate (SNV) preprocessing, and partial least squares regression (PLS), quantitative prediction models were developed for fixed carbon, volatile matter, and ash content by using full wavelengths and feature wavelengths selected by competitive adaptive reweighted sampling (CARS). Results indicated that models based on feature wavelengths outperformed those using full wavelengths. The optimal models for fixed carbon, volatile matter, and ash content were SG+MSC-CARS-PLS, SG-CARS-PLS, and SG+MSC-CARS-PLS, with

收稿日期：2024-08-03 修回日期：2024-09-12
基金项目： 国家重点研发计划项目(2022YFD2002101)
作者简介： 潘宇轩(2000—)，男，硕士生，主要从事农机机电技术研究，E-mail: 13372506033@163.com
通信作者： 周海燕(1980—)，女，研究员，博士，主要从事农业机械设计研究，E-mail: emilyzhy@126.com

prediction set correlation coefficients R^2 of 0.891 6, 0.931 7, and 0.929 7, respectively. The root mean square errors of prediction set (RMSEp) were 1.46%, 1.39%, and 0.42%, yielding relative prediction deviations (RPD) of 2.54, 3.44, and 3.18, demonstrating accurate prediction capabilities. Furthermore, an online detection module for straw composition was designed. The module was divided into three units: the spectroscopic acquisition unit, the power supply unit, and the control and transmission unit. The pre-built model for predicting straw composition was embedded in the module. Based on the Raspberry Pi 4B development board and its built-in Wi-Fi module, it enabled functions such as online spectroscopic acquisition, model computation, and data transmission for straw. Through prototype testing, it was demonstrated that the module design and window location selection could capture near-infrared spectroscopic curves that met the requirements for online analysis. By using the slope/intercept calibration method, the laboratory model was transferred to the production line for online application. The prediction accuracy of fixed carbon, volatile matter, and ash content was improved, fulfilling the requirements for online analysis and providing data support for the regulation of pyrolysis process parameters.

Key words: straw; carbonization production line; online detection; NIR

0　引言

秸秆是我国最主要的农林废弃物，每年产量高达 7.23×10^8 t[1]。生物炭是一种新型碳材料，是有机原料在厌氧或限氧条件下热解后的固体产物[2]。由于其具有提高土壤肥力、补充土壤养分和固碳等潜在能力，近年来生物炭在农业和环境领域发挥了重要作用[3-4]。因此，利用农作物秸秆作为制备生物炭的原料，可以有效缓解秸秆处理的压力和环境污染。

固定碳、挥发分、灰分含量是衡量生物炭品质的重要指标，与热解工艺参数特别是炭化温度有关，如灰分含量会随炭化温度升高而增加；也与秸秆原料相应指标的含量具有线性关系，固定碳含量高的秸秆热解后的生物炭固定碳含量也高[5-8]。当前产业需要根据秸秆原料上述指标含量调整炭化温度等工艺参数，从而实现对生物炭品质的调控。传统的实验室分析过程繁琐、耗时长，不适用于大规模和自动化的生产场景。因此，需要开发一种针对秸秆原料固定碳、挥发分、灰分含量快速检测的技术及装置，为产线热解工艺参数的动态调控提供数据支撑。

近红外光谱分析技术是一种快速分析分子结构的技术，具有快速、高效、无损的特点[9]。已有研究将其应用于秸秆的组分分析，根据秸秆不同的资源化利用途径，目前针对秸秆饲料化利用的研究较多，且部分研究涉及灰分指标的预测[10-16]。虽然文献[17-20]表明了近红外光谱预测秸秆成分的可行性，但是所使用秸秆样品基本经过干燥细粉，与生产时的粗切处理存在较大差距，缺乏针对粗切秸秆固定碳、挥发分、灰分含量的可靠预测模型。同时，针对秸秆在线检测这一工业化应用场景的研究有所欠缺。当前的炭化产线基本采用以炭化炉为主体的连续式生物质热解设备，粗切的秸秆原料通过上料机构连续喂入，秸秆堆叠松散造成光谱噪声大，给在线光谱的采集带来困难。目前已有研究采用溜管安装的方式实现豆粕品质的近红外在线检测[21]，秸秆原料同样可以采取这一方式采集在线光谱，但需要选择秸秆具有一定压实度的位置进行开窗，保证光谱的质量。

因此，面向炭化生产线对原料秸秆炭化成分在线检测的需求，本文首先基于近红外光谱技术开展粗切秸秆固定碳、挥发分、灰分成分含量的检测方法研究，再设计秸秆原料炭化成分检测模块并进行在线验证，以期为秸秆炭化产线热解工艺参数的调控提供支撑。

1　基于近红外光谱的秸秆炭化成分含量检测方法

1.1　秸秆原料收集与化学值采集

本研究面向河南济源润万家公司的秸秆炭化生产线，如图 1 所示。根据该产线的原料来源进行秸秆样品采集，在河南省、吉林省的 41 个市县共采集玉米秸秆样品 93 个，参照产线的原料处理方式室温(20℃)干燥、除杂并切制至 10~20 mm 长。所有样品用四分法取样，分别用于挥发分、灰分含量和含水率测定以及光谱分析。



图 1　炭化产线全景(红色框为秸秆上料机构)

Fig. 1　Panoramic view of carbonization production line (red box is straw feeding mechanism)

样品的含水率和挥发分、灰分含量分别根据ASTM E1756-08(2020)[22]和ASTM E872-82(2019)[23]、ASTM E1755-01(2020)[24]方法测定,样品的固定碳含量则差值计算得到。样品的每个含量设置2次平行实验测定,并使测定的结果满足重复性限定条件,取2次平行实验结果的均值作为最终含量,最终结果如表1所示。

表1 秸秆样品中3种成分含量统计分析

Tab. 1 Statistical analysis of three components in straw samples

%

参数	最小值	最大值	均值	标准差
固定碳质量分数	6.96	25.01	17.27	4.65
挥发分质量分数	50.18	81.49	68.41	5.26
灰分质量分数	4.16	11.64	7.11	1.70

1.2 秸秆近红外光谱采集

1.2.1 光谱采集单元设计

光谱采集单元实现光谱数据采集的功能,由光源、光谱仪、耦合透镜、漫反射光路支架组成,其中漫反射光路支架中搭载着光源、光谱仪与耦合透镜。图2为光谱采集单元外观及内部示意图。

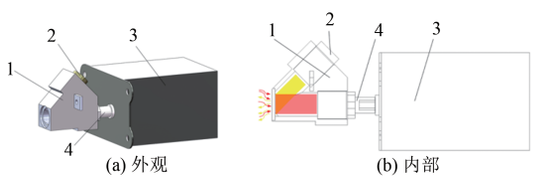


图2 光谱采集单元外观及内部示意图

Fig. 2 Spectral acquisition unit structure diagram

1. 漫反射光路支架 2. 卤素灯管 3. 光谱传感器 4. 耦合透镜

1.2.1.1 光谱传感器选型

过往研究基本选用近红外全波段光谱仪对细粉秸秆建模,本研究为满足在线检测模块的小型化需求,同时兼顾粗切秸秆模型的精度要求,应选用体积小、波段范围尽可能长的光谱传感器。最终选用滨松C15511-01光栅型光谱传感器,具有一定的抗振动性能,探测范围为1 100~2 500 nm,尺寸为47 mm×57 mm×76 mm,质量为300 g,实物图及建模图如图3所示。同时为提高信号强度和信噪比,设计高通光量耦合透镜与光谱传感器连接,使样品表面光汇聚到狭缝内。

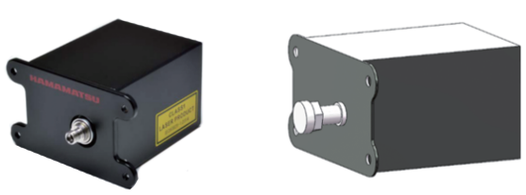


图3 滨松C15511-01光谱传感器

Fig. 3 Hamamatsu C15511-01 spectral sensor

1.2.1.2 光源选型

光谱采集从原理上可以分为入射光源分光和检测信号分光2种方式。入射光源分光的方式通常采用多个窄带特征LED组合依次照射样本,利用光电二极管接收逐个特征信号,但在实际应用过程中精度、稳定性较低。因此选择检测信号分光方式,采用卤素灯作为光源为检测提供能量。本装置选择一款带有灯珠与灯杯,且对光具有汇聚作用的8916-726型卤素灯(Welch Allyn公司,美国),光源的额定工作电压为5 V,可以提供3.81 mm的聚束光斑,最大程度保证了光源的使用效率,8919-726型卤素灯实物图如图4所示。

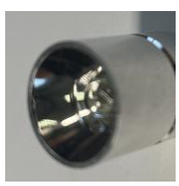


图4 Welch Allyn 8919-726型卤素灯

Fig. 4 Welch Allyn 8919-726 Halogen lamp

1.2.1.3 漫反射光路支架设计

基于漫反射光谱原理,根据光谱仪及光源型号自行设计漫反射光路支架,如图5所示。透镜一端与光谱仪相连,另一端与聚光块相连,光源插入支架中,与透镜呈45°角。

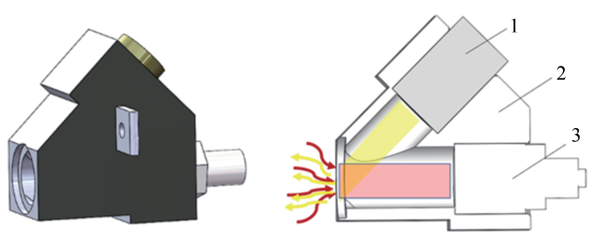


图5 漫反射光路支架

Fig. 5 Diffuse reflection light path

1. 光源 2. 漫反射光路支架 3. 耦合透镜

1.2.2 光谱采集单元搭建与光谱采集

基于上述光谱传感器、光源、光路支架选型与设计,搭建面向产线开窗检测的秸秆光谱采集单元,对秸秆进行光谱分析。光谱传感器连接计算机控制,卤素灯供电电压5 V,如图6所示。光谱采集参数设置为:近红外光谱波段为9 091~4 000 cm^{-1}(1 100~2 500 nm),分辨率为8 cm^{-1},扫描次数为64次。获得93份秸秆样本的吸收光谱,如图7所示。

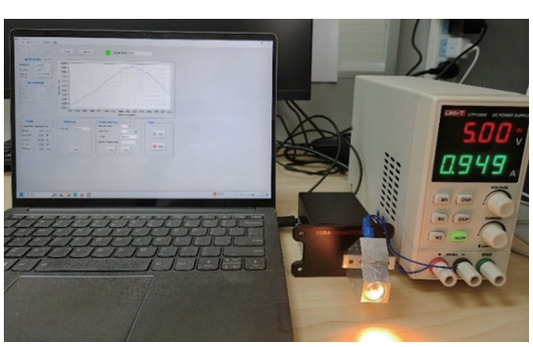


图6 秸秆光谱采集过程

Fig. 6 Spectrum acquisition process of straw

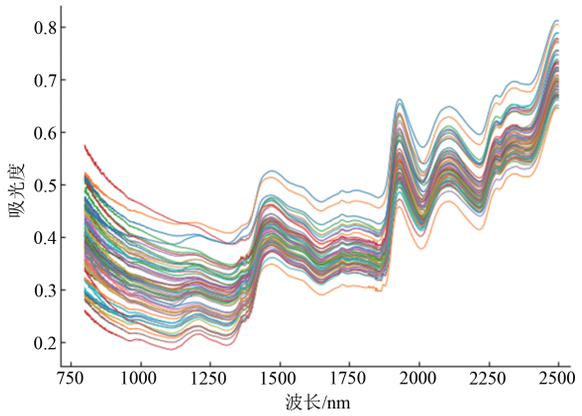


图7　玉米秸秆原始光谱

Fig. 7　Original spectrum of corn stalk

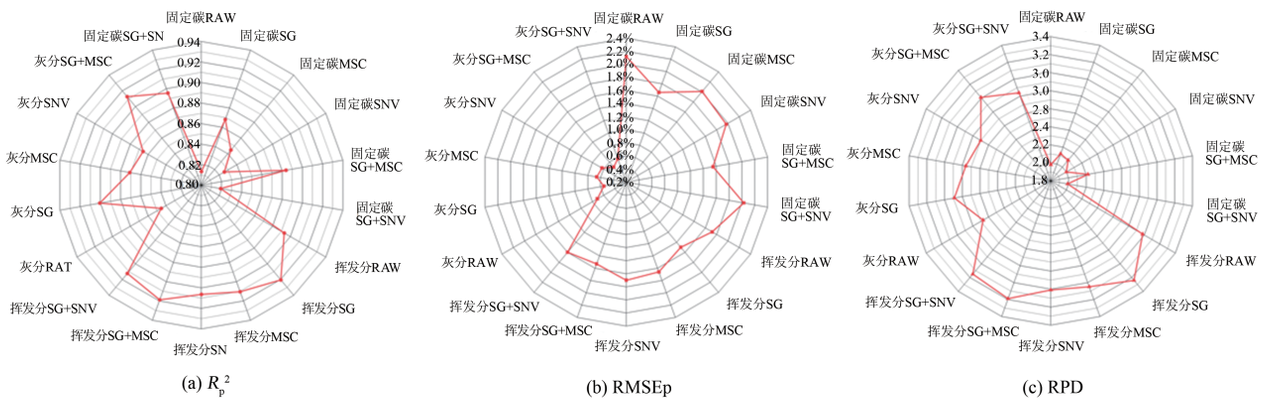
1.3　数据分析与模型构建

1.3.1　不同预处理下全波长预测模型构建

为校正原始光谱数据中的各种噪声源和误差，选择 Savitzky-Golay 平滑（Savitzky-Golay smoothing，SG）、标准正态变量（Standard normal variate，SNV）和多元散射校正（Multiplicative scatter correction，MSC）方法对全波长的原始光谱进行预处理[25]，再建立偏最小二乘（Partial least squares，PLS）模型，比较得出最优的预处理方法。

为了评估所提出模型的泛化性能，选择了3种常用指标进行分析：均方根误差（RMSE）、决定系数 R^2 和残差预测偏差（RPD）[26]。

不同预处理后的秸秆全波长PLS模型对固定碳、挥发分、灰分质量分数的测试集预测结果如图8所示。单一和组合预处理方法相较原始光谱都在一定程度上提升了模型预测精度，对于固定碳质量分数，最佳的预处理方法为SG平滑结合多元散射校正（SG+MSC），测试集的决定系数 R_p^2 为0.883 8，预测均方根误差（RMSEc）为1.55%，相对分析误差（RPD）为2.22；对于挥发分质量分数，最佳的预处理方法为SG平滑，测试集的决定系数 R_p^2 为0.920 5，预测均方根误差（RMSEp）为1.50%，相对分析误差为3.24；灰分质量分数的最佳预处理方法同样为SG平滑结合多元散射校正（SG+MSV），测试集的决定系数 R_p^2 为0.912 6，预测均方根误差为0.50%，相对分析误差为3.01。



(a) R_p^2　　(b) RMSEp　　(c) RPD

图8　不同预处理后模型预测性能对比

Fig. 8　Comparison of prediction performance of different pretreated models

模型对挥发分和灰分含量的预测性能优于固定碳，一方面由于粗切秸秆致密度不均给原始光谱带来噪声，表现在光谱曲线800~900 nm、1 375~1 400 nm有明显振动，另一方面是由于间接计算固定碳含量时引入的累计误差影响了预测效果。只有挥发分质量分数和灰分质量分数模型的相对分析误差RPD达到3.24和3.01，固定碳模型的RPD只有2.22，无法满足精确预测。后续对3种成分的预处理光谱分别进行特征波长提取，建立精度更高的模型。

1.3.2　基于特征波长的预测模型构建

竞争自适应重加权采样（Competitive adaptive reweighted sampling，CARS）算法是通过自适应重加权采样技术选择出PLS模型中回归系数绝对值大的波长点，去掉权重小的波长点，反复迭代采样并利用交互验证比较每次采样的交互验证均方根误差，直至找到最小交互验证均方根误差所包含的最优变量子集，即特征波长集合。为提高检测速度和精度，在经最优预处理的光谱数据基础上对固定碳、挥发分、灰分进行特征波长提取，再分别建立PLS模型。

固定碳、挥发分、灰分含量的特征波长选取过程如图9所示。设定蒙特卡罗采样次数为50，通过10倍交叉验证方法确定变量的显著性。以固定碳质量分数的特征波长提取过程为例，随着采样次数的增加，其交互验证均方根误差（RMSECV）总体先减小后增大，减小说明光谱中与固定碳无关的变量被逐步剔除，之后又增大说明变量剔除过多导致有用信息的丢失。在第24次采样时RMSECV达到最小值，表明该次的变量提取结果为最优，各变量的系数值反映在竖直星号位置，该次取样的变量即为固定碳的特征波长。

因此，固定碳、挥发分、灰分质量分数经CARS方法分别在第24、26、23次取样时RMSECV最小，分别提取了63、44、73个特征波长，分别占总波长数4.95%、3.75%、5.73%，如图10所示。

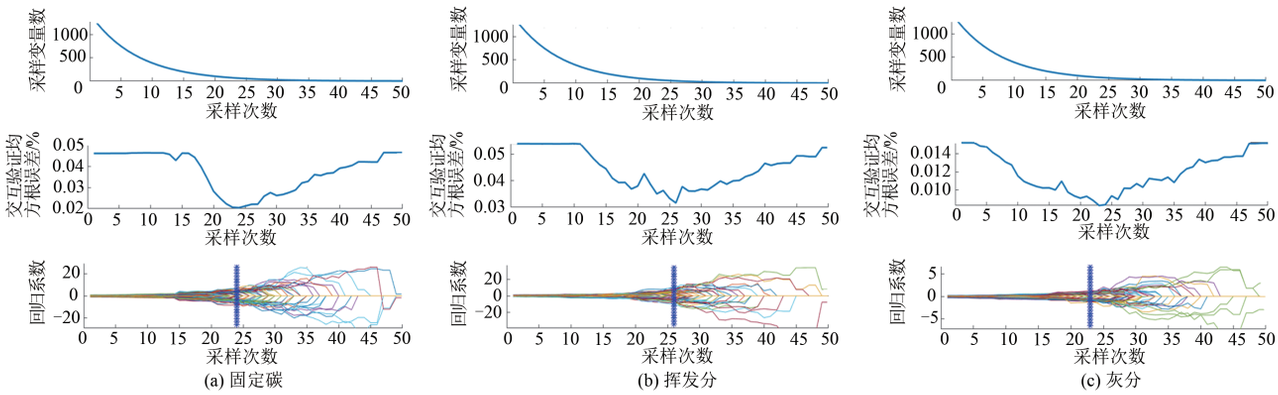


图9 3种成分的特征筛选过程

Fig. 9 Feature screening process of three components

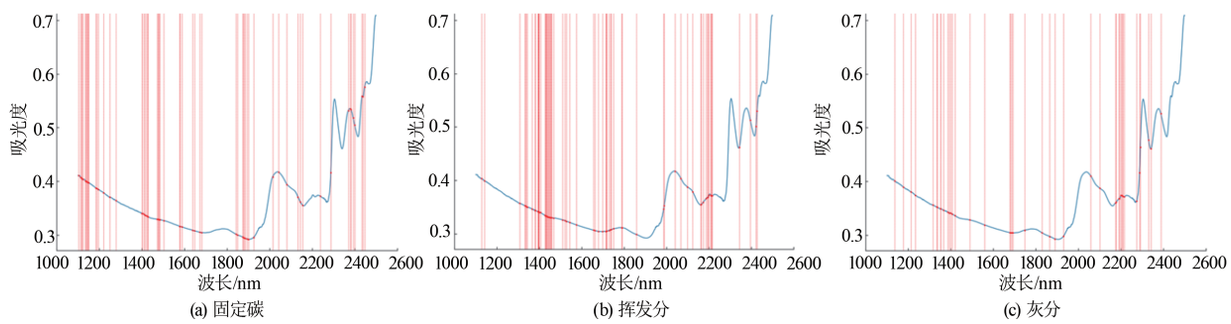


图10 3种成分的特征波长筛选结果

Fig. 10 Feature wavelength screening results of three components

经CARS算法变量筛选后，利用PLS方法分别建立秸秆固定碳、挥发分、灰分含量的预测模型，建模结果如图11所示。通过散点图分布可以直观看到固定碳、挥发分、灰分质量分数预测值与参考值之间相关性，散点越靠近对角线，模型预测性能越好。与全波长模型散点图比较，特征波长建模的散点更趋近对角线。两种模型性能指标如表3所示，从表3可以看出，使用CARS挑选特征波长后，固定碳、挥发分、灰分的模型效果均有所提升，固定碳、挥发分、灰分质量分数的测试集决定系数R^2分别为0.891 6、0.931 7、0.929 7；测试集均方根误差分别为1.46%、1.39%、0.42%，较全波长模型分别降低5.81%、7.33%、16.00%。另外，模型对固定碳的相对分析误差由2.22提升到2.54，实现对固定碳的精确预测。因此，采用CARS方法能在不丢失关键信息的情况下有效选出与固

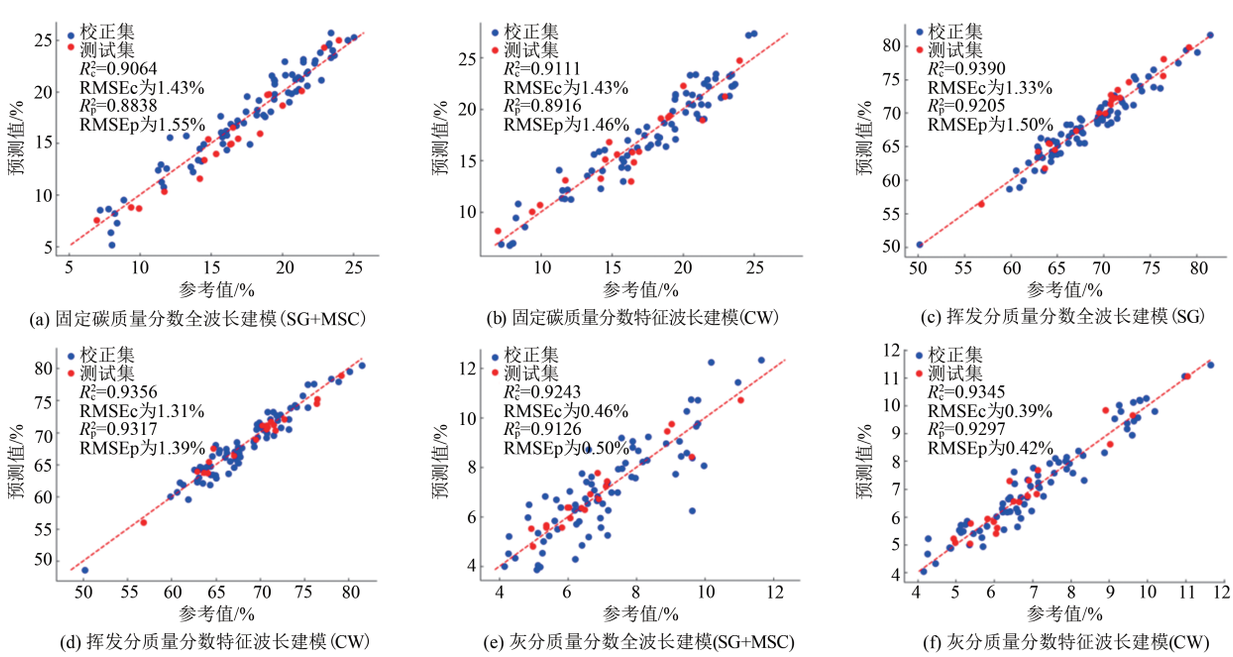


图11 全波长与特征波长建模散点图

Fig. 11 Scatterplots of full-wavelength and feature-wavelength modeling

定碳、挥发分、灰分相关的特征波长变量，大幅度降低模型计算量的同时，构建了3种成分含量的可靠预测模型，为开发基于特征波长变量的秸秆成分检测装置提供支撑。

表3　全波长与特征波长建模结果对比

Tab. 3　Comparison of modeling results of full wavelength and characteristic wavelength

参数	模型	变量数	校正集		测试集		
			R_c^2	均方根误差/%	R_p^2	均方根误差/%	RPD
固定碳质量分数	PLS	1 273	0.906 4	1.43	0.883 8	1.55	2.22
	CARS-PLS	63	0.911 1	1.39	0.891 6	1.46	2.54
挥发分质量分数	PLS	1 273	0.939 0	1.33	0.920 5	1.50	3.24
	CARS-PLS	44	0.935 6	1.31	0.931 7	1.39	3.44
灰分质量分数	PLS	1 273	0.924 3	0.46	0.912 6	0.50	3.01
	CARS-PLS	73	0.934 5	0.39	0.929 7	0.42	3.18

2　秸秆成分含量在线检测模块设计

2.1　装置硬件总体设计方案

在线检测模块主要包括外壳、漫反射光路支架、滨松C15511-01型近红外光谱仪、耦合透镜、光源、电源适配器、稳压稳流芯片、树莓派4B主控板。装置硬件系统如图12所示，可分为供电单元、光谱采集单元和控制传输单元。整个模块通过电源适配器外接工厂220 V交流电，经稳压芯片、稳流芯片分别连接树莓派、卤素光源，实现降压及系统供电；光谱采集单元包括漫反射光路支架、光源、耦合透镜与光谱仪，实现秸秆近红外漫反射光谱数据的采集；控制与传输单元主要通过树莓派4B主控板，完成光谱采集控制、数据处理，再由自带的Wi-Fi模块实现数据传输等功能。

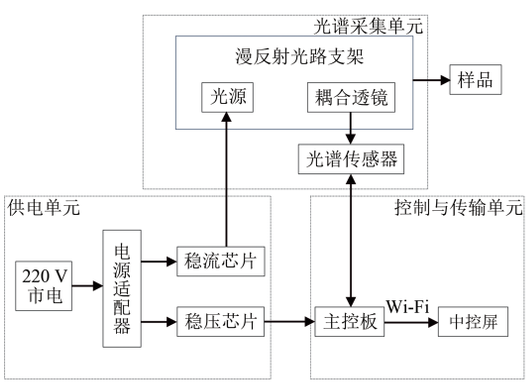


图12　检测模块硬件系统框架图

Fig. 12　Device hardware system framework

2.2　光谱采集单元

光谱采集单元设计同1.2.1节，实现光谱数据采集的功能，由光源、光谱仪、耦合透镜、漫反射光路支架组成，其中漫反射光路支架中搭载着光源、光谱仪与耦合透镜。

2.3　供电单元

装置通过12 V 7 A适配器外接工厂220 V交流电插座，通过稳流芯片提供0.9 A电流给卤素光源，通过稳压芯片提供5 V电压给树莓派，树莓派通过USB接口连接光谱传感器供电，如图13所示。

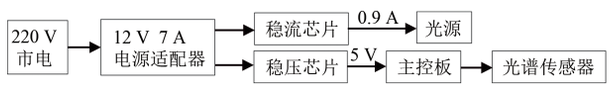


图13　供电示意图

Fig. 13　Schematic of power supply

2.4　控制与传输单元

控制与传输单元实现光谱传感器控制、数据处理、光谱数据与其他数据传输功能。本装置选用树莓派Raspberry Pi 4B作为核心控制单元，它是一款以SD存储卡作为内存储器，基于Linux系统的一种微型计算机，具有处理信息速度快、体积小、拓展性强等优点。设计开发检测装置的控制程序，每隔3 s采集一次光谱数据，然后进行相应的预处理，再调用嵌入的成分含量预测模型进行计算。树莓派自带Wi-Fi模块实现无线网络连接，通过向监控平台服务器的指定端口发起HTTP请求并建立TCP连接，实现光谱曲线、成分含量等数据的传输、储存与显示，如图14所示。

2.5　整体结构

基于上述设计开发了秸秆成分在线检测模块，如图15所示。模块外壳设计长方体形，其中树莓派固定在固定板上，固定板通过滑轨插入；光谱采集模块的漫反射支架和传感器分别通过两端耳板固定在壳体上；模块窗口嵌入蓝宝石窗片，壳体与后盖上分别预留直径1 mm的半圆形凹槽，用于硅胶垫圈的嵌合，实现防尘防水功能。

2.6　模块安装位置

河南济源润万家公司的炭化产线上料机构由入料口、料仓、螺旋输送器和机壳组成，如图16所示。

粗切的秸秆原料通过上料机构连续喂入，秸秆堆叠松散造成光谱噪声大，需要选择秸秆具有一定压实度的位置进行开窗，保证光谱的质量。上料过程中，秸秆在料仓内有明显堆积，因此开窗及安装位置选择在料仓侧壁左上方，整个模块通过焊接在产线上的耳板与装置上的螺纹孔固定，如图17所示。

2.7　在线验证与调试

将秸秆成分检测模块安装于济源润万家炭化生产线

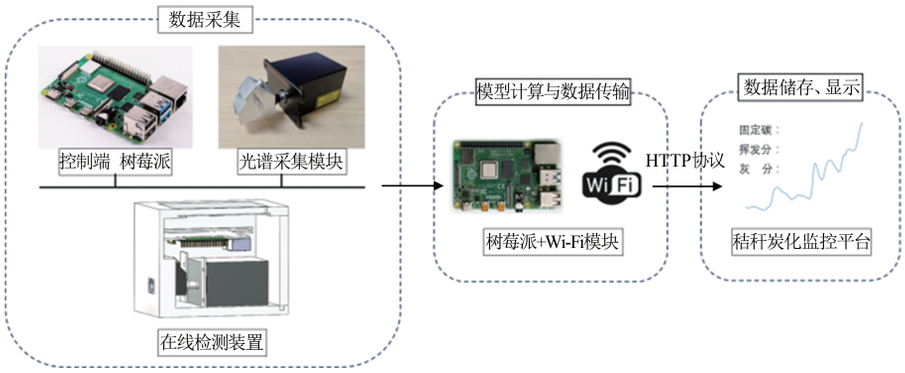
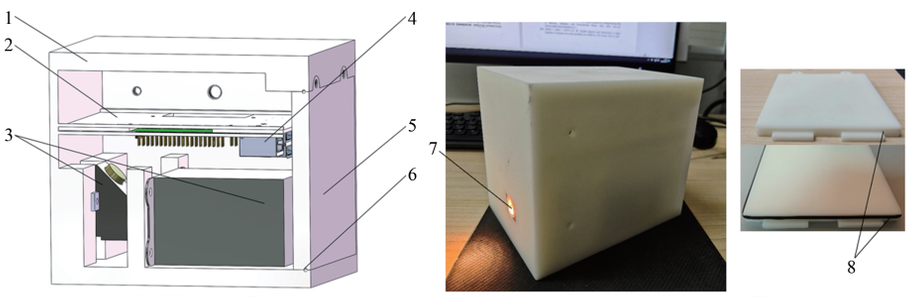


图14 控制与传输过程示意图

Fig. 14 Schematic of control and transmission process



(a) 检测模块三维图 (b) 检测模块实物图

图15 秸秆成分在线检测模块

Fig. 15 Straw composition online detection module

1. 外壳 2. 固定板 3. 光谱采集单元 4. 树莓派 5. 后盖 6. 垫圈槽 7. 蓝宝石窗片 8. 垫圈

的料仓壁相应位置，并进行秸秆原料的近红外光谱实时采集与预测。经验证，该模块可实现在秸秆上料过程中持续获得有效的近红外光谱曲线，图18中绿色为在产线上采集的秸秆光谱，黑色为实验室建模的秸秆光谱。从图中可以看出，在线光谱存在微量噪声，但与建模光谱相比趋势一致、波峰一致，已符合近红外光谱建模要求。

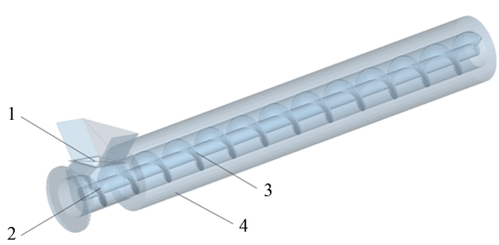


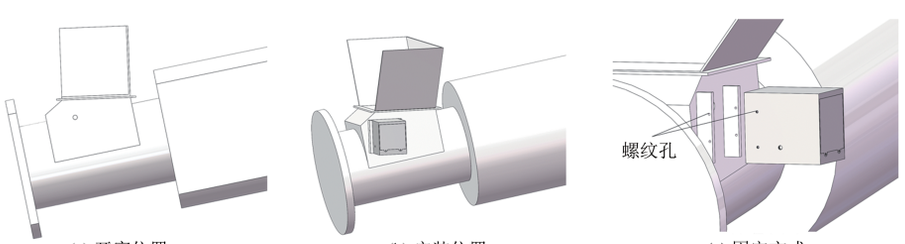
图16 秸秆上料机构模型

Fig. 16 Model of straw feeding mechanism

1. 入料口 2. 料仓 3. 螺旋输送器 4. 机壳

实验室模型转移到在线应用时通常需要调整与校正，由于在线光谱与实验室光谱差异不大，因此采用斜率/截距校正方法，将产线上的15份秸秆样品作为校正样品，获取在线预测值，然后测量该样品的化学值，通过预测值与实测值的残差对模型进行斜率/截距校正，以消除动态光谱引入的误差。

图19为经过调试后模型的预测散点图，与图11相比，调试后固定碳、挥发分、灰分质量分数模型R_p^2分别为0.927 4、0.941 1、0.945 2，大于原来的0.891 6、0.931 7、0.929 7；RMSEp分别为1.32%、1.32%、0.39%，较原来模型的1.46%、1.39%、0.42%分别降低0.14、0.07、0.03个百分点，降幅达9.59%、5.04%、7.14%。图20为模型调试前后在产线上的预测值与实测值的残差散点图，校正后模型预测误差更小、波动也更小。综上，模型经产线样品校正后比实验室精度更高，可以实现精确预测。



(a) 开窗位置 (b) 安装位置 (c) 固定方式

图17 开窗及安装示意图

Fig. 17 Window opening and installation diagram

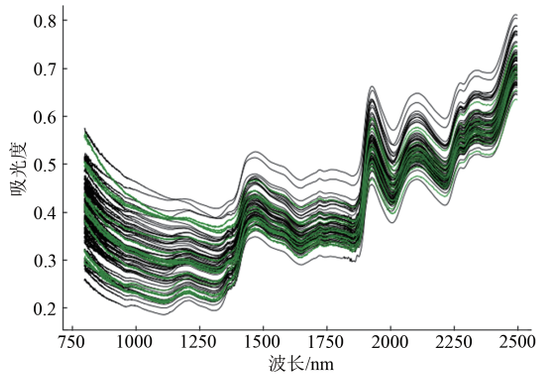


图 18　润万家产线和实验室的秸秆光谱图

Fig. 18　Straw spectra acquired in Runwanjia production line and laboratory

了波长范围为 1 100~2 500 nm 的便携式光谱传感器并设计漫反射检测光路，搭建了秸秆在线光谱采集模块。结合 Savitzky-Golay 卷积平滑（SG）、多元散射校正（MSC）、标准正态变换（SNV）预处理方法和偏最小二乘法（PLS），分别建立了基于全波长和基于竞争性自适应重加权法（CARS）筛选的特征波长的秸秆固定碳、挥发分、灰分含量预测模型，结果表明特征波长的建模效果优于全波长，对固定碳、挥发分、灰分含量预测的最优模型分别为 SG+MSC-CARS-PLS、SG-CARS-PLS、SG+MSC-CARS-PLS，预测集决定系数 R^2 分别为 0.891 6、0.931 7、0.929 7，预测集均方根误差分别为 1.46%、1.39%、0.42%，相对分析误差分别为 2.54、3.44、3.18，能够实现精确预测。

3　结论

（1）面向生物炭产线秸秆原料的在线检测场景，选择

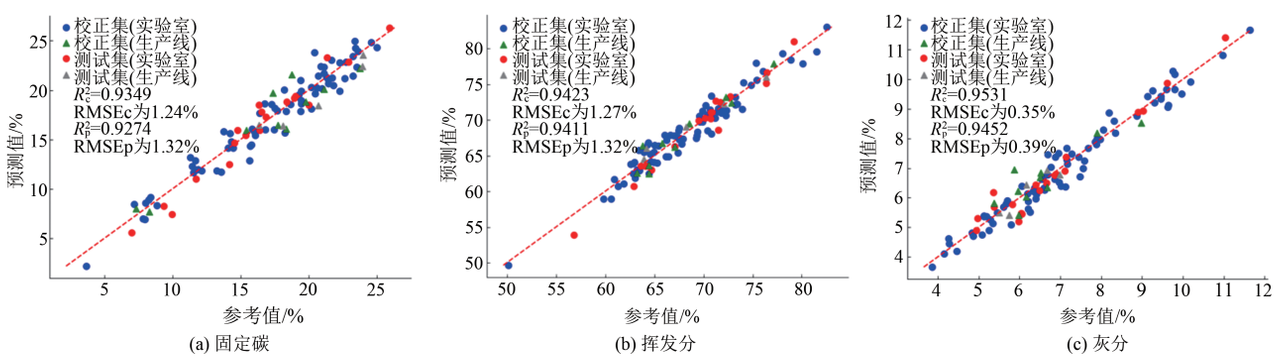


图 19　校正模型预测散点图

Fig. 19　Corrected models prediction scatter plots

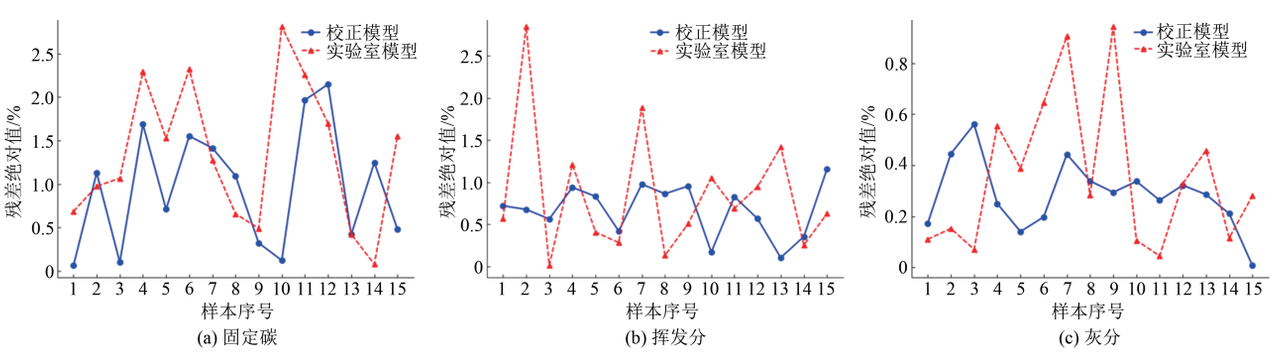


图 20　模型校正前后预测残差散点图

Fig. 20　Prediction residual scatter plots before and after model correction

（2）分光谱采集单元、供电单元、控制与传输单元设计开发了秸秆成分在线检测模块，嵌入已构建的秸秆成分预测模型，基于 Raspberry Pi 4B 开发板和其自带的 Wi-Fi 模块实现秸秆在线光谱采集、模型计算、数据传输等功能，实现对产线上秸秆炭化成分的在线检测。

通过样机试验验证，证明该模块设计及开窗位置选择可以采集满足在线分析要求的近红外光谱曲线，同时采用截距校正的方法，将实验室模型转移到产线进行在线应用，固定碳、挥发分、灰分含量预测精度均得到提升，可以达到在线分析需求。

参　考　文　献

[1] HUANG X, PAN G, LI L, et al. Combined resource utilization of ash from biomass power generation and wheat straw biochar for soil remediation[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 193: 105150.

[2] CLOUGH T J, CONDRON L M, KAMMANN C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. Agronomy, 2013, 3(2): 275 - 293.

[3] ALAMGIR AHMAD K, AHMAD E, AL MESFER M K, et al. Bio-coal and bio-coke production from agro residues[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 473: 145340.

[4] 丛宏斌，姚宗路，赵立欣，等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报，2019，35(22)：132－140.
CONG Hongbin，YAO Zonglu，ZHAO Lixin，et al. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(22)：132－140.(in Chinese)

[5] BROOKS B，RISH S K，LOMAS H，et al. Advances in low carbon cokemaking — influence of alternative raw materials and coal properties on coke quality[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis，2023，173：106083.

[6] HOWER J C，FINKELMAN R B，EBLE C F，et al. Understanding coal quality and the critical importance of comprehensive coal analyses [J]. International Journal of Coal Geology，2022，263：104120.

[7] SPENCER W，SENANAYAKE G，ALTARAWNEH M，et al. Review of the effects of coal properties and activation parameters on activated carbon production and quality[J]. Minerals Engineering，2024，212：108712.

[8] WANG X，YANG Z，LIU X，et al. The composition characteristics of different crop straw types and their multivariate analysis and comparison[J]. Waste Management，2020，110：87－97.

[9] BEĆ K B，GRABSKA J，HUCK C W，et al. In silico NIR spectroscopy — a review. Molecular fingerprint，interpretation of calibration models，understanding of matrix effects and instrumental difference [J]. Spectrochimica Acta Part A：Molecular and Biomolecular Spectroscopy，2022，279：121438.

[10] 孔庆明，谷俊涛，高睿，等. 基于组合偏最小二乘的特征波段优选方法在氨、碱化处理玉米秸秆粗蛋白检测中的研究[J]. 分析测试学报，2020，39(11)：1334－1343.
KONG Qingming，GU Juntao，GAO Rui，et al. Study on detection of crude protein in ammonified and alkalized corn straw by spectrum characteristic band selection method based on synergy interval partial least squares[J]. Journal of Instrumental Analysis，2020，39(11)：1334－1343.(in Chinese)

[11] 杨增玲，薛俊杰，贺城，等. 不同光谱采集条件下麦秸低位热值NIRS快速检测[J]. 农业机械学报，2013，44(8)：139-142，132.
YANG Zengling，XUE Junjie，HE Cheng，et al. Rapid detection of net calorific value for wheat straw under different NIRS collection conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(8)：139－142，132.(in Chinese)

[12] 薛俊杰，韩鲁佳，杨增玲，等. 玉米秸秆饲料营养成分NIRS在线检测[J]. 农业机械学报，2016，47(7)：216－223.
XUE Junjie，HAN Lujia，YANG Zengling，et al. On-line measurement of nutrient content of corn stover using NIRS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(7)：216－223.(in Chinese)

[13] GUO T，DAI L，YAN B，et al. Measurements of chemical compositions in corn stover and wheat straw by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Animals，2021，11(11)：3328.

[14] NIELSEN N S，STUBBS T L，GARLAND-CAMPBELL K A，et al. Rapid estimation of wheat straw decomposition constituents using near-infrared spectroscopy[J]. Agronomy，2019，9(8)：462.

[15] HUANG C，HAN L，LIU X，et al. The rapid estimation of cellulose，hemicellulose，and lignin contents in rice straw by near infrared spectroscopy[J]. Energy Sources，Part A：Recovery，Utilization，and Environmental Effects，2010，33(2)：114－120.

[16] WANG Y，JIANG F，GUPTA B，et al. Variable selection and optimization in rapid detection of soybean straw biomass based on CARS [J]. IEEE Access，2018，6：5290－5299.

[17] LIU L，YE X P，WOMAC A R，et al. Variability of biomass chemical composition and rapid analysis using FT-NIR techniques[J]. Carbohydrate Polymers，2010，81(4)：820－829.

[18] 闫佰鹏，王芳彬，李成海，等. 利用近红外光谱技术快速评定油菜秸秆的营养价值[J]. 草业科学，2019，36(2)：522－530.
YAN Baipeng，WANG Fangbin，LI Chenghai，et al. Rapid evaluation of nutritional value of rape straw by near infrared spectroscopy[J]. Pratacultural Science，2019，36(2)：522－530.(in Chinese)

[19] ALEMU T，WAMATU J，TOLERA A，et al. Optimizing near infrared reflectance spectroscopy to predict nutritional quality of chickpea straw for livestock feeding[J]. Animals，2021，11(12)：3409.

[20] 皇才进，韩鲁佳，刘贤，等. 基于近红外光谱技术的秸秆工业分析[J]. 光谱学与光谱分析，2009，29(4)：960－963.
HUANG Caijin，HAN Lujia，LIU Xian，et al. Proximate analysis of straw by near infrared spectroscopy (NIRS)[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2009，29(4)：960－963.(in Chinese)

[21] 杨增玲，杨钦楷，沈广辉，等. 豆粕品质近红外定量分析实验室模型在线应用[J]. 农业机械学报，2019，50(8)：358－363，371.
YANG Zenglin，YANG Qinkai，SHEN Guanghui，et al. Online application of soybean meal NIRS quantitative analysis model from laboratory to factory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(8)：358－363，371.(in Chinese)

[22] ASTM E1756-08 test method for determination of total solids in biomass[S]. 2020.

[23] ASTM E872-82 test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels[S]. 2019.

[24] ASTM E1755-01 test method for ash in biomass[S]. 2020.

[25] 刘文政，周雪健，平凤娇，等. 基于可见-近红外光谱的鲜食葡萄成熟品质关键指标检测[J]. 农业机械学报，2024，55(2)：372－383.
LIU Wenzheng，ZHOU Xuejian，PING Fengjiao，et al. Detection of key indicators of ripening quality in table grapes based on visible-near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(2)：372－383.(in Chinese)

[26] 赵经华，马世骄，房城泰，等. 基于熵权-模糊综合评价法的无人机多光谱春玉米长势监测模型研究[J]. 农业机械学报，2024，55(8)：214－224.
ZHAO Jinghua，MA Shijiao，FANG Chengtai，et al. Growth monitoring of spring maize using UAV multispectral imaging based on entropy weight-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(8)：214－224.(in Chinese)