

吴金恺, 刘乃森, 曹 静, 等. 基于智能移动设备的低成本微型作物光谱反射率测量仪设计与实现[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(3): 469-477.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.03.009

基于智能移动设备的低成本微型作物光谱反射率测量仪设计与实现

吴金恺^{1,2}, 刘乃森³, 曹 静², 胡佳楠², 潘嫻嫻², 毕 然², 郭靖宇³, 王许淇³, 霍丹琪³, 张文宇^{1,2,3}

(1. 江苏大学农业工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院无锡分院, 江苏 无锡 214174; 3. 淮阴师范学院/区域现代农业与环境保护省部共建协同创新中心/江苏省环洪泽湖生态农业生物技术重点实验室/江苏省洪泽湖蓝藻预警与生态修复工程研究中心, 江苏 淮安 223300)

摘要: 为实现作物生长信息的低成本、实时、无损监测, 本研究基于光谱分析技术, 选择 395 nm 和 800 nm 2 个波段, 根据光学系统原理和小型化需求, 进行基于智能移动设备的低功耗微型作物光谱反射率测量仪研发, 包括封装壳体、光学系统和硬件电路设计及控制系统 App 开发; 并使用积分球和 ASD Fieldspec 4 Hi-Res 地物光谱仪对测量仪 4 个通道(395 nm 和 800 nm 太阳光接收通道和作物反射光接收通道)的测量值进行标定, 并以反射率为 20%、40%、60%、100% 的 4 块标准灰度板为测量对象检验测量仪的准确性。结果表明: 4 个通道标定方程的决定系数均在 0.998 0 以上, 395 nm 和 800 nm 反射率的均方根误差分别为 1.46% 和 1.07%, 平均绝对误差分别为 1.17% 和 0.82%; 4 块标准反射率灰度板在 395 nm 和 800 nm 2 个波段测得反射率的相对误差分别小于 2.0% 和 3.6%, 变异系数分别在 1.36%~4.17% 和 0.78%~2.36%。该测量仪体积 32 cm³, 质量仅 20 g, 且具有低成本、高精度、易操作、可升级等特性, 可实现基于智能移动设备的作物生长实时监测。

关键词: 生长监测; 智能测量仪; 微型化; 智能手机; 光谱反射率

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)03-0469-09

Design and implementation of low-cost miniature crop spectral reflectance meter based on smart mobile devices

WU Jin-kai^{1,2}, LIU Nai-sen³, CAO Jing², HU Jia-nan², PAN Yuan-yuan², BI Ran², GUO Jing-yu³, WANG Xu-qi³, HUO Dan-qi³, ZHANG Wen-yu^{1,2,3}

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences Wuxi Branch, Wuxi 214174, China; 3. Huaiyin Normal University/Collaborative Innovation Center of Regional Modern Agriculture & Environmental Protection Co-constructed by the Province and Ministry/Jiangsu Key Laboratory for Eco-Agricultural Biotechnology around Hongze Lake/Jiangsu Engineering Research Center for Cyanophytes Forecast and Ecological Restoration of Hongze Lake, Huaian 223300, China)

收稿日期: 2024-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001005, 2022YFD2001001); 江苏省重点研发计划项目(BE2023323); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(21)2008]; 无锡市财政项目(33212303)

作者简介: 吴金恺(1999-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事智能传感器研究。(E-mail) kevinwujk@163.com

通讯作者: 张文宇, (E-mail) research@wwery.cn; 刘乃森, (E-mail) boomzip@163.com

Abstract: In order to achieve low-cost, real-time and non-destructive monitoring of crop growth information, based on spectral analysis technology, this study selected two bands, 395 nm and 800 nm, and carried out the research and development of a low-power miniature crop spectral reflectance measuring instrument based on a smart mobile device according to the principle of the optical sys-

tem and miniaturisation requirements, including the package housing, optical system and hardware circuit design and control system App development. Measurements of the four channels (395 nm and 800 nm sunlight receiving channels and crop reflected light receiving channels) of the meter were calibrated using an integrating sphere and a spectrometer (ASD), and the accuracy of the meter was checked using four grey scale panels with standard reflectance (20%, 40%, 60%, 100%). The results showed that the coefficients of determination of the calibration equations of the four channels were above 0.998 0, the root mean square errors of 395 nm and 800 nm reflectance were 1.46% and 1.07%, and the average absolute errors were 1.17% and 0.82%, respectively. The relative errors of the reflectance measured by the four standard reflectance greyscale panels in the 395 nm and 800 nm bands were less than 2.0% and 3.6%, respectively, and the coefficients of variation were in the ranges of 1.36%–4.17% and 0.78%–2.36%, respectively. With a volume of 32 cm³ and a weight of only 20 g, the instrument is low-cost, high-precision, easy-to-operate, and scalable, which can realize real-time crop growth monitoring based on smart mobile devices.

Key words: growth monitoring; smart meter; miniaturization; smart phone; spectral reflectance

智慧农业是以信息、知识、装备为核心要素的现代农业生产方式,是各国现代农业科技竞争的制高点、未来农业发展的新业态^[1]。而作物生长监测是进一步开展长势诊断和动态调控的基础和前提,是智慧农业的关键核心技术^[2]。因此,快速、精准获取作物生长信息是栽培技术从传统模式向智慧化转变的第一步,可为作物生产的智慧化管理甚至品种选育提供数据支撑,也是智慧农业的重点研究内容。

传统的作物生长信息获取方法有外观诊断法^[3-5]、化学分析法等,但外观诊断得到的作物长势信息往往受主观影响较大,精确度较差;通过化学分析得到的作物长势信息准确度高,但需要破坏性取样,且耗时费力,无法适应智慧农业对无损和高效的要求。20 世纪 70 年代以来,随着遥感技术的高速发展,通过多光谱或高光谱实时、无损、精确、快速获取作物生长信息已成为现代农业的新特征,为作物长势诊断和产量预测提供了新途径^[6]。国内外学者利用遥感技术,已在水稻^[7-8]、小麦^[9]、油菜^[10-11]、玉米^[12]、马铃薯^[13]等作物的生长^[14-15]、营养状况^[16]、品质^[17]和产量性状^[18-19]无损监测方面开展了大量工作。

上述研究中光谱信息的采集大多使用通用光谱监测仪器得到。如美国 ASD 公司生产的 FieldSpec 系列便携式地物光谱仪,其中 FieldSpec FR spectroradiometer 高光谱仪光谱范围 350~2 500 nm,光谱分辨率 1 nm,内置偏移校正、漂移锁定和漂移补偿等算法,可以获取丰富的地物光谱信息,目前已在众多研究中得到应用^[20-22]。美国 Holland Scientific 公司生产的 Crop Circle ACS-470 植物冠层光谱仪采用调制多色发光二极管(LED)阵列发射 430~850 nm 光

波、3 通道硅光电二极管阵列作为光电探测器,测量光谱范围为 320~1 100 nm,可以测量作物营养状况以及作物冠层和土壤的反射率信息^[23-24]。日本 TOPCON 株式会社研制的 Cropspec 车载式作物生长传感器使用激光二极管脉冲进行 730~740 nm 和 800~810 nm 作物冠层反射率的测量,进而确定叶片叶绿素含量和氮含量^[25]。利用上述仪器采集的地物光谱波段多、信息丰富,适合于科学研究,但因售价较为昂贵、体积庞大、操作繁琐、维修不易、数据分析及二次开发门槛较高,导致其难以在农业生产中大面积推广应用。

为推动基于光谱的农作物生长监测技术的农业应用,各国学者或企业加强了小尺寸的农作物生长监测专用传感器或设备的研制。日本 Minolta Camera 公司生产的 SPAD-502 叶绿素仪通过测量 650 nm 波段(红光)和 940 nm 波段(近红外光)的叶片透射率,进而得到作物叶片的叶绿素含量,实现作物营养状况诊断^[26]。Sui 等^[27]采用卤钨灯发出恒定光源,使用滤光片得到特定波长的红光、绿光、蓝光和近红外光,研制出的植物营养诊断仪可以实现作物植株含氮量监测,准确度达 90% 以上。Yao 等^[28]利用 LED 发射波长为 730 nm 和 810 nm 的光波,研制出的主动光源作物生长诊断仪可以实现作物叶面积指数、叶干质量、叶片含氮量和氮积累量等信息的监测,但该诊断仪长期工作时,光源将变得不稳定,且易受环境光的影响,监测结果的准确性会下降。Moya 等^[29]基于太阳光被动光源设计的作物叶绿素监测装置可实现远距离的作物叶绿素含量无损监测。Zhong 等^[30]以太阳光为光源,通过采集 550 nm、650 nm、760 nm 和 850 nm 等波段光谱信息,设

计的智能作物养分状况监测装置可以有效预测冬小麦叶片叶绿素含量。Ni 等^[31]通过测量 720 nm 和 810 nm 处的作物冠层光谱反射率,研发的多光谱便携式作物生长诊断仪可以实现作物叶片含氮量、叶片氮积累量、叶面积指数、冠层生物量等生长指标的实时监测。上述研发的监测设备已初步实现作物生长监测设备的轻量化,但其价格仍较为昂贵,算法升级需要返厂,为其推广应用带来了不便。

本研究旨在利用智能移动设备高计算能力的特性,设计与之适配的低成本、小体积、高效率作物光谱反射率测量仪,在田间应用时能够直接使用智能移动设备控制测量仪实时获取作物反射光谱,通过估算得到作物长势信息,以期降低作物生长监测设备的成本,推动作物生长监测设备的普及应用和智慧农业的发展。

1 基于智能移动设备的低成本微型作物反射率测量仪设计

测量仪由光学系统、硬件电路、封装壳体 and 软件系统组成,外观结构如图 1。测量仪通过 Type-C 接头和智能移动设备连接,为了尽量减小测量仪的尺寸和质量,测量仪不含电池,完全由移动设备供电。采集指令由移动设备发出,移动设备接收到测量仪数据后进行处理并呈现在 App 中。



图 1 测量仪外观

Fig.1 Appearance of the meter

1.1 封装壳体设计

封装壳体对测量仪的光学元件、电路板(PCB)等起固定作用,同时还需保证光路的正常工作。本研究研发的测量仪封装壳体主要分为上部端盖和下部端盖两部分。上部端盖的光学窗口接收太阳光,下部端盖的光学窗口接收作物的反射光(图 2)。

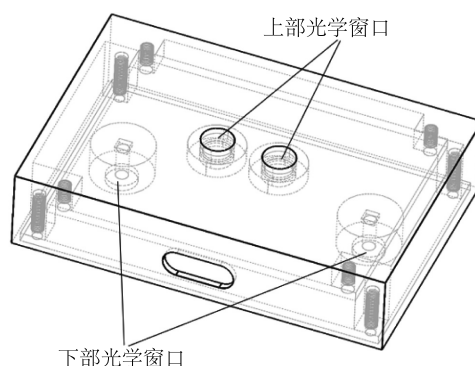


图 2 测量仪封装壳体设计图

Fig.2 Packaging shell design diagram of the meter

上部端盖的光学通道内设有余弦校正器、滤光片、减光片的搁置台阶,侧面设有 Type-C 接口的安装孔以及 PCB 和下部端盖的固定孔。PCB 固定支柱采用合适的高度,以保证安装 PCB 后,PCB 上的光电探测器的上表面正好贴合滤光片(图 3)。

下部端盖的光学窗口安装滤光片,下部端盖光学通道的孔径与孔深决定了传感器的视场角,同时保证安装后探测孔刚好贴合光电探测器(图 3)。

1.2 光学系统设计

测量仪的光学系统主要包括上部接收单元和下部接收单元。上部接收单元接收入射的太阳光,下部接收单元接收作物的反射光。上、下部接收单元均具有 395 nm 和 800 nm 2 个光学通道,各光学通道使用特定的滤光片以获取对应波长的光信号,滤光片的型号分别为 BP395-25K 和 BP800-40K,半高宽为 25 nm 和 40 nm。上部单元在滤光片上方还装有余弦校正器,余弦校正器为乳白玻璃,其朝向太阳的一面为粗糙面,可在一定程度上消减太阳高度角对测量准确性的影响。

光电探测器感光面的直径为 d ,通过设置下部单元光学通道的长度(h),可以确定传感器的视场角(图 4),该测量仪的视场角为 30° 。

本研究选择 TSL2561 作为光电探测器,其对 395 nm 和 800 nm 两个波段均有较高的响应度。TSL2561 可以直接将光信号转化为数字信号,降低了电路的复杂度,使电路更加稳定,并且 TSL2561 的体积较小,符合微型传感器电子元器件选型要求,提高了便携性。TSL2561 焊接在 PCB 上后,其四周覆盖黑色硅胶垫,避免外部光线进入光通路。

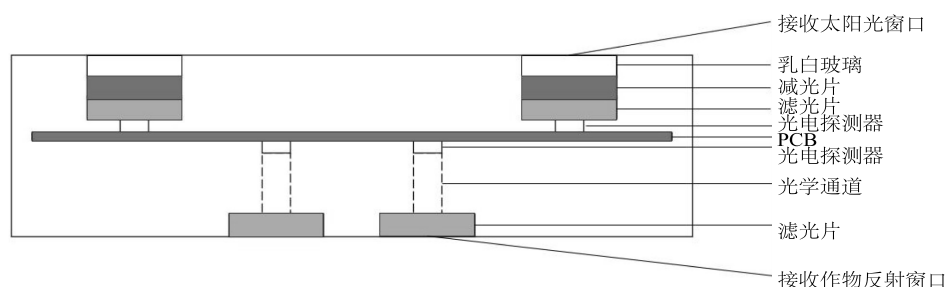


图3 光学通道前视示意

Fig.3 Schematic front view of the optical channel

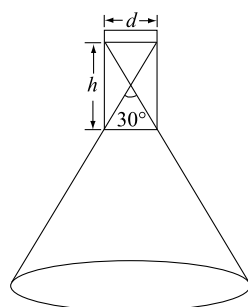


图4 测量仪视场角示意

Fig.4 Schematic diagram of the meter field of view

1.3 硬件电路设计

硬件电路用来处理光信号并与移动设备通信。微控制单元(MCU)在接收移动设备发送的指令后,开始依次采集上部单元 395 nm、上部单元 800 nm、下部单元 395 nm 和下部单元 800 nm 通道的光照度数据并发送给移动设备,由移动设备进行数据处理(图5)。

MCU 采用 MSP430I2401 16 位单片机(美国德州仪器公司产品),工作电压为2.2~3.6 V,有激活、待机、关闭、关断4种工作模式,可以让器件在不到5 μs的时间内从低功耗模式唤醒至激活模式,含有用于通信的通用异步收发器(UART)、双向两线制串行通信接口I²C等外围设备,以及16位RISC架构和高达16.384 MHz的系统时钟。

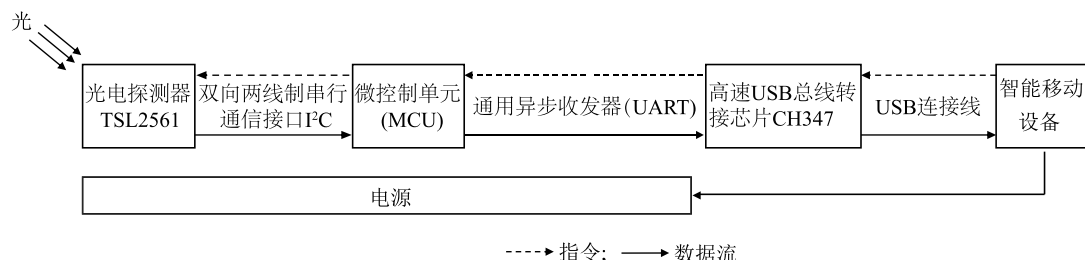


图5 硬件电路总体设计

Fig.5 Overall design of the hardware circuit

电源芯片采用可升降电压的TPS63001,转换效率达96%,输入电压范围为1.8~5.5 V,输出电压3.3 V,静态电流小于50 μA。在低负载电流下,转换器会进入省电模式。

USB接口与传感器信息转换采用高速USB总线转接芯片CH347(南京沁恒微电子股份有限公司产品)。该芯片提供USB总线转异步串口、I²C同步串行接口、SPI同步串行接口等功能。在异步串口方式下,CH347提供2个高速串口,收发控制指令、数据流和调制解调器(Modem)联络信号。

光数字转换器(Light-to-digital converters)选用美国TAOS公司推出的高速、低功耗、量程宽、可编程、配置灵活的光数字转换芯片TSL2561。该芯片数字输出符合标准的SMBus和I²C总线协议,用户可自定义中断上限和下限阈值。该芯片采用1.25 mm×1.75 mm超小封装,超低功耗,工作电压为2.7~3.3 V。

因为TSL2561最多只能配置3个地址,而本研究使用了4个TSL2561,因此采用了ADG774多路复用开关,该器件具有低功耗、高开关速度、低导通

电阻等特性,采用 3.3/5.0 V 单电源供电。由 MCU 来控制多路复用开关,当采集太阳面数据时 S1A 和 S2A 导通,采集作物面数据时 S1B 和 S2B 导通。导通的电阻曲线在整个模拟输入范围内非常平坦,非常适合便携式电池供电的仪器。

1.4 软件设计

测量仪嵌入式程序在 IAR Embedded Workbench 中采用 C 语言编写,主要有控制 TSL2561 采集光信号、模拟开关通道切换、数据传输转换等模块。程序基于开源的 Contiki 嵌入式操作系统开发,具有小巧、高效和可扩展等特点,可以运行在多种嵌入式设备和硬件平台上,并支持多种通信协议和网络技术。

软件系统主要有初始化、指令接受、数据采集和数据发送等进程。系统启动时会自动运行初始化进程(Initialization),在配置 MCU 通信参数以及其他参数的同时,令其他进程均处于等待事件的状态。指令接收进程启动后,Contiki 操作系统会将串口接收到的 Type-C 消息通过串行事件信息(Serial_line_event_message)进行广播。当接收到串口的消息后,MCU 对消息进行解析,解析完成后,通过事件通知进入相应的进程。若串口信息为采集指令,则启动数据采集进程,光传感器模块依次采集上部单元 395 nm,上部单元 800 nm,下部单元 395 nm 和下部单元 800 nm 通道的数据。数据采集完成后,启动数据发送进程,将采集到的数据通过 Type-C 接口发送到智能设备。智能设备接收到数据后进行 2 个波段反射率、植被指数等的计算,计算完成后将数据呈现至手机 App 页面。

手机 App 界面如图 6 所示,测量仪连接到手机后点击“扫描设备”,若发现设备则自动连接并提示连接成功。点击“采集”按钮传感器开始执行采集数据指令,并接收传感器采集的数据。App 可记录每个样品区最多 5 个采样点的数据并生成反射率柱状图以及每个采样点在 395 nm 和 800 nm 处的反射率、归一化植被指数、氮含量。点击“保存数据”以保存当前采集的数据,点击“历史数据”可以查看先前保存的数据。

2 测量仪的标定

利用积分球和光谱仪对测量仪进行标定。标定所用积分球由广州景颐光电科技有限公司制造,积



图 6 智能移动设备 App 界面

Fig.6 The interface of smart mobile device App

分球直径 200 mm,出光口直径 70 mm,出光口均匀性大于 98%,稳定性在 1% 以内,波段范围为 250~2 500 nm。积分球出光口的光照度数据由 ASD FieldSpec 4 Hi-Res 地物光谱仪(美国 ASD 公司产品)测量。

试验在暗室中进行,将测量仪和 ASD 探测头固定在积分球前的支架上,传感器接收光平面与积分球出光口平面平行。积分球亮度的调节通过调节电源来实现,电源电压最大可达 12 V,实验时按 0.5 V 梯度降低电压,同一电压下采集传感器 4 个通道测量的电压值(mV)和光谱仪的遥感影像元亮度值。

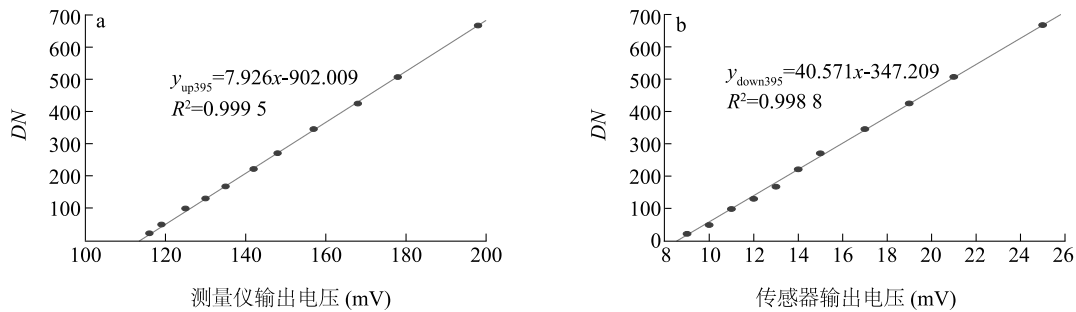
由于研究选用的滤光片中心波长为 395 nm 和 800 nm,半高宽为 25 nm 和 40 nm,所以取 ASD 波长为 383~407 nm 和 780~820 nm 的平均遥感影像元亮度值(DN)作为测量仪 395 nm 和 800 nm 处标定值。利用 ASD 的 DN 对测量仪各光学通道输出的电压进行标定,标定结果如图 7、图 8 所示。由图可知,4 个通道标定系数存在一定差别,但 ASD 测得的 DN 和测量仪输出的电压呈现较好的线性关系,各通道决定系数(R^2)均大于 0.998 0。标定完成后即可计算 395 nm 和 800 nm 波段的反射率,方法如下:

$$R_{395} = \frac{y_{\text{down}395}}{y_{\text{up}395}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{800} = \frac{y_{\text{down}800}}{y_{\text{up}800}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 $y_{\text{up}395}$ 、 $y_{\text{down}395}$ 分别表示 395 nm 光学通道太阳面、作物面标定后的 DN , $y_{\text{up}800}$ 、 $y_{\text{down}800}$ 分别表示

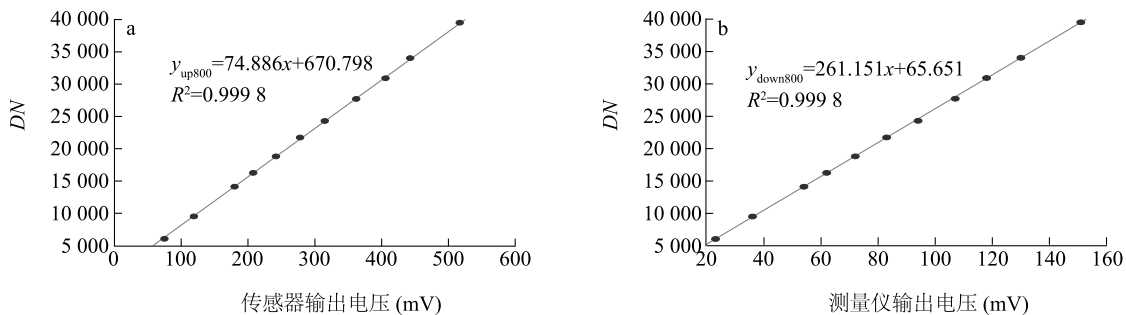
800 nm 光学通道太阳面、作物面标定后的 DN , R_{395} 、 R_{800} 分别表示 395 nm、800 nm 光学通道的反射率。



a: 太阳光接收通道; b: 作物反射光接收通道。

图 7 不同光接收通道 395 nm 波段测量仪输出电压与地物光谱仪测得遥感影像像元亮度值 (DN) 的关系

Fig.7 Relationship between the output voltages of the meter at 395 nm band and the digital number (DN) values measured by the geophysical spectrometer for different optical receiver channels



a: 太阳光接收通道; b: 作物反射光接收通道。

图 8 不同光接收通道 800 nm 波段测量仪输出电压与地物光谱仪测得遥感影像像元亮度值 (DN) 的关系

Fig.8 Relationship between the output voltages of the meter at 800 nm band and the digital number (DN) values measured by the geophysical spectrometer for different optical receiver channels

3 测量仪性能及参数

选择晴朗无云天气在 10:50–13:50 时段内, 分别以 20%、40%、60%、100% 的标准反射率灰度板为测量对象, 每隔 10 min 测量 1 次并计算反射率, 检验测量仪测量反射率的准确性。使用 1:1 图、均方根误差 ($RMSE$)、平均绝对误差 (MAE)、相对误差 (RE)、变异系数 (CV) 检验测量仪的准确性。测量仪测得的反射率与灰度板的标准反射率很接近, 395 nm 和 800 nm 的 $RMSE$ 分别为 1.46% 和 1.07%, MAE 分别为 1.17% 和 0.82% (图 9)。以 4 个标准反射率灰度板为测量对象, 395 nm 和 800 nm 波段测量仪测得的反射率相对误差 (RE) 分别小于 2.0% 和 3.6% (图 10), 变异系数 (CV) 分别为 1.36% ~

4.17% 和 0.78% ~ 2.36% (图 11)。上述结果均表明测量仪测得的反射率与实际值基本一致。

当前, 利用光谱手段进行作物生长监测已成为智慧农业的核心技术之一。本研究开发的测量仪与目前部分商品化的测量设备参数对比如表 1 所示。从表中可以看出, 目前市场上主流的商品化光谱设备普遍价格昂贵、携带不便, 限制了基于光谱的监测技术的推广应用。

针对携带不便的问题, 本研究设计的测量仪简化了电源系统, 改为由智能手机直接供电, 选用体积小于 2.2 mm^3 的光数字转换芯片 TSL2561, 简化电路结构, 测量仪体积约为 32 cm^3 , 质量仅 20 g, 均远低于同类设备。如此小的体积和质量使该测量仪具有极高的便携性, 且该测量仪机械结构相对简单, 不易损坏, 适合在田间使用。

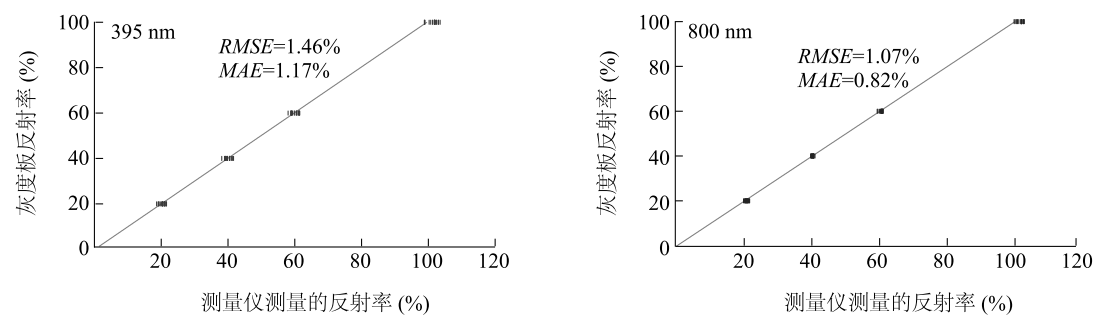


图 9 测量仪测量值与标准反射率的 1 : 1 图
Fig.9 Meter-measured reflectance vs. standard reflectance

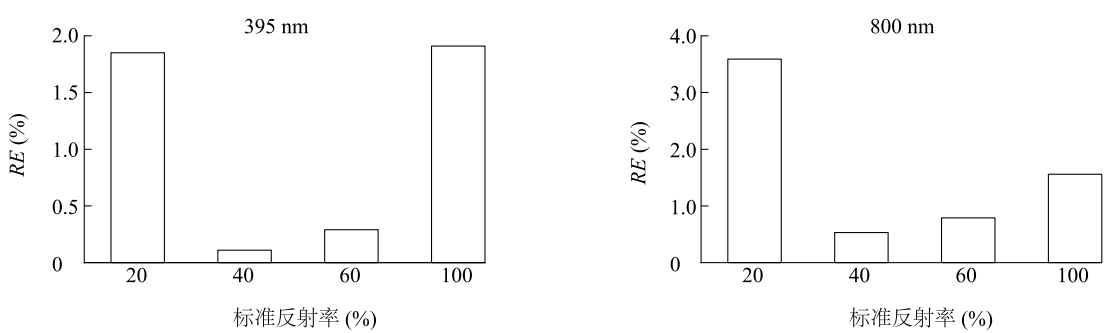


图 10 测量仪所测反射率的相对误差 (RE)
Fig.10 The relative error (RE) of the reflectivity measured by meter

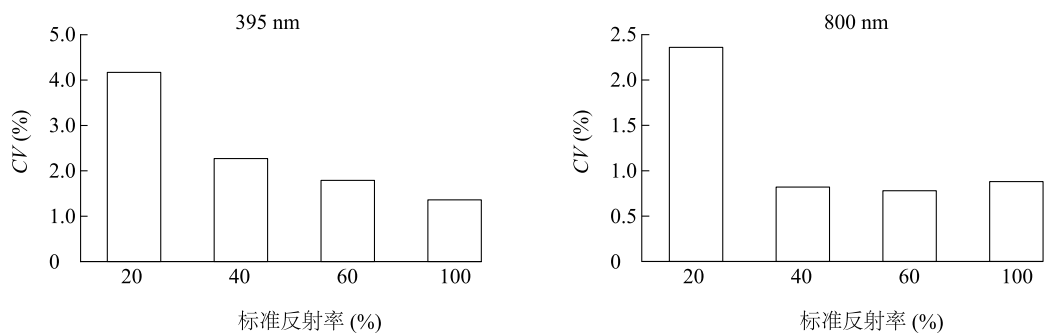


图 11 测量仪所测得反射率的变异系数 (CV)
Fig.11 The coefficient of variation (CV) of the reflectivity measured by the meter

表 1 部分仪器参数对比

仪器名称	测量指标	体积 (cm ³)	质量 (g)	成本
本试验设计的测量仪	反射率、NDVI 等	32	20(不含移动设备)	千元级
CGIS ^[32]	反射率、NDVI	约 150	250(含电池)	万元级
Green Seeker	NDVI	约 3 500	1 100(含电池)	万元级
SPAD-502	SPAD 值	约 620	225(不含电池)	万元级
N-PEN N110	NDGI	约 280	188	十万元级

针对数据单一和升级流程繁琐的问题,本研究设计的测量仪采集的数据均由手机 App 处理,依靠手机的强大计算能力,能够显示如反射率、植被指数、含氮量等丰富的信息,且后续可以通过更新 App 来优化测量模型和算法,提高测量准确率,扩充功能。农户可通过手机 App 更便捷地了解作物生长情况,从而为农作物的精准调控、降本增效提供依据。

本研究设计的测量仪成本为千元级,批量生产后还可以进一步降低成本,而市面上功能相近的作物生长传感器都在万元级以上,一般农户难以承担,因此,本研究设计的测量仪更具有推广潜力和市场。

4 讨论

针对监测作物类型和参数类型单一的问题,本研究设计的测量仪可针对不同作物类型和参数类型定制不同波段的滤光片,再配合 App 的更新嵌入不同的算法模型,从而实现多作物多参数的监测。

本研究设计的作物生长信息测量仪仍存在一些改进之处:1) 视场角的大小决定了采集作物光谱信息区域的大小,若视场角过大则会采集到目标作物外的光谱信息,导致测量不准确。若视场角过小则会导致采集信息的一致性不高,所测区域的代表性差,采样的误差大。所以合适的视场角是准确采集光谱信息的前提,本测量仪目前视场角定为 30° ,控制适当的距离可以精准的测量小范围的叶幕或单叶,但也一定程度上限制了测量范围。2) 滤光片的表面近似为光滑的镜面,尽管滤光片的外侧安装有余弦校正器,但是当太阳的高度角变化时,滤光片的光线透过率仍有差异,与其他基于太阳光谱的测量仪一样,本研究研发的测量仪测量精度也受到太阳高度角变化的影响,最佳工作时间限制在正午前后。

5 结论

(1) 本试验研制出了一种基于智能移动设备的微型作物反射率测量仪,该测量仪通过 Type-C 接头与智能移动设备连接,由智能移动设备直接供电,简化了电路结构,减小了体积。测量仪的视场角为 30° ,光谱波段为 395 nm 和 800 nm,测量仪接收到采集指令后,直接将采集到的数据发送到智能移动设备,由 App 处理数据,并进行显示。

(2) 使用积分球和 ASD FieldSpec 4 Hi-Res 地物

光谱仪对测量仪进行了标定,建立了测量仪 395 nm 和 800 nm 不同光学通道的标定方程,其决定系数 (R^2) 均在 0.998 0 以上。

(3) 以 20%、40%、60%、100% 的标准反射率灰度板为测量对象,测量仪所测 395 nm 和 800 nm 反射率的 RMSE 分别为 1.46% 和 1.07%,MAE 分别为 1.17% 和 0.82%,RE 分别小于 2.0% 和 3.6%,CV 分别为 1.36%~4.17% 和 0.78%~2.36%。

参考文献:

- [1] 赵春江,李 瑾,冯 献. 面向 2035 年智慧农业发展战略研究[J]. 中国工程科学,2021,23(4):1-9.
- [2] 曹卫星,姚 霞,程 涛,等. 作物生长监测技术的研究与应用[C]// 中国作物学会. 2019 年中国作物学会学术年会论文摘要集. 北京:中国作物学会,2019.
- [3] 周广西.《沈氏农书》所载水稻施肥技术研究[J]. 南京农业大学学报(社会科学版),2006,6(1):69-72.
- [4] 陶勤南,方 萍,吴良欢,等. 水稻氮素营养的叶色诊断研究[J]. 土壤,1990(4):190-193.
- [5] 曹绍文. 作物叶色诊断施肥比色卡[J]. 今日科技,1989(7):20.
- [6] ZHU Y, YAO X, TIAN Y, et al. Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2008,10(1):1-10.
- [7] 赵春江,黄文江,王纪华,等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究[J]. 中国农业科学,2002,35(8):980-987.
- [8] 周启发,王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特性的关系[J]. 浙江农业大学学报,1993,19(增刊1):42-47.
- [9] 姚 霞,朱 艳,田永超,等. 小麦叶层氮含量估测的最佳高光谱参数研究[J]. 中国农业科学,2009,42(8):2716-2725.
- [10] 曹正邓渊,文双雅,高志强. 甘蓝型油菜叶绿素荧光参数的高光谱预测[J]. 江苏农业科学,2023,51(18):185-190.
- [11] 张筱蕾,刘 飞,裴鹏程,等. 高光谱成像技术的油菜叶片氮含量及分布快速检测[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(9):2513-2518.
- [12] DELLINGER A E, SCHMIDT J P, BEEGLE D B. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor[J]. Agronomy Journal,2008,100(6):1546-1552.
- [13] BORHAN M S, PANIGRAHI S, LORENZEN J H, et al. Multi-spectral and color imaging techniques for nitrate and chlorophyll determination of potato leaves in a controlled environment[J]. Transactions of the ASAE,2004,47(2):599.
- [14] 魏永康,杨天聪,臧少龙,等. 基于无人机多光谱影像特征融合的小麦倒伏监测[J]. 中国农业科学,2023,56(9):1670-1685.
- [15] 王伟康,张嘉懿,汪 慧,等. 基于固定翼无人机多光谱影像的水稻长势关键指标无损监测[J]. 中国农业科学,2023,56(21):4175-4191.

- [16] 凌琪涵,孔发明,宁 强,等. 基于无人机多光谱影像的水稻氮营养监测[J]. 农业工程学报,2023,39(13):160-170.
- [17] 姜友谊,刘博伟,张成健,等. 利用无人机多光谱影像的多品种玉米成熟度监测[J]. 农业工程学报,2023,39(20):84-91.
- [18] 黄 璐,包云轩,郭铭淇,等. 稻纵卷叶螟危害下水稻叶片光谱特征及产量估测[J]. 中国农业气象,2023,44(2):154-164.
- [19] 陈 悦,赵庚星,常春艳,等. 基于 Sentinel-2 多光谱影像的小麦-玉米轮作耕地粮食产量估测——以曹县为例[J]. 应用生态学报,2023,34(12):3347-3356.
- [20] TANG Y L, WANG R C, HUANG J F. Relations between red edge characteristics and agronomic parameters of crops[J]. Pedosphere,2004,14(4):467-474.
- [21] PRADHAN S, BANDYOPADHYAY K K, SAHOO R N, et al. Predicting wheat grain and biomass yield using canopy reflectance of booting stage[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2014,42(4):711-718.
- [22] SUN J, SHI S, GONG W, et al. Evaluation of hyperspectral LiDAR for monitoring rice leaf nitrogen by comparison with multi-spectral LiDAR and passive spectrometer[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):40362.
- [23] CHEN P, HABOUDANE D, TREMBLAY N, et al. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat[J]. Remote Sensing of Environment,2010,114(9):1987-1997.
- [24] SARLIKIOTI V, MEINEN E, MARCELIS L F M. Crop reflectance as a tool for the online monitoring of *LAI* and *PAR* interception in two different greenhouse crops[J]. Biosystems Engineering,2011,108(2):114-120.
- [25] 段友青,高广智. 精准农业农机装备智能化配置[J]. 现代化农业,2015(3):60-61.
- [26] DEBAEKE P, ROUET P, JUSTES E. Relationship between the normalized *spad* index and the nitrogen nutrition index: application to durum wheat[J]. Journal of Plant Nutrition,2006,29(1):75-92.
- [27] SUI R, THOMASSON J A. Ground-based sensing system for cotton nitrogen status determination[J]. Transactions of the ASABE, 2006,49(6):1983-1991.
- [28] YAO L, WU R, WU S, et al. Design and testing of an active light source apparatus for crop growth monitoring and diagnosis[J]. IEEE Access,2020,8:206474-206490.
- [29] MOYA I, CAMENEN L, EVAIN S, et al. A new instrument for passive remote sensing:1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence[J]. Remote Sensing of Environment,2004,91(2):186-197.
- [30] ZHONG Z, LI M, SUN H, et al. Development and application of a smart apparatus for detecting crop nutrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(S2):215-219.
- [31] NI J, ZHANG J, WU R, et al. Development of an apparatus for crop-growth monitoring and diagnosis[J]. Sensors,2018,18(9):3129.
- [32] LIU N, ZHANG W, LIU F, et al. Development of a crop spectral reflectance sensor[J]. Agronomy,2022,12(9):2139.

(责任编辑:石春林)