

基于光环境校正的便携作物叶绿素检测仪设计

唐伟杰¹ 王楠² 刘国辉¹ 赵若梅¹ 李民赞^{1,3} 孙红¹

(1. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670)

摘要: 为快速获取作物的生长状态信息及时指导农业生产,基于作物生理生化光谱学响应机理,设计了基于光环境校正的便携作物叶绿素检测装置。装置测量以 610、680、730、760、810、860 nm 为中心,20 nm 带宽的反射光谱以及环境光照光谱数据,计算植被指数并预测植物叶绿素含量,在环境光照强度较差时使用主动补光灯进行补光,并对补光条件下环境光照强度进行校正。实验表明 GPS 定位在纬度最大漂移为 6.2 m、经度最大漂移为 4.9 m;光谱传感器 6 个波段的光强响应与照度计测量值之间的决定系数均超过 0.99;标定的 2 块光谱传感器的匹配系数在 610 nm 和 860 nm 波段分别为 0.743、1.035。建立了 610 nm 和 860 nm 波段补光强度与测量距离间的拟合模型用于光环境校正;使用无纺布进行了叶绿素梯度实验,建立了植被指数 NDVI 与植物叶绿素含量的数学模型,在较差光环境条件下不进行补光的模型决定系数为 0.685,补光并进行校正情况下模型决定系数为 0.965。

关键词: 叶绿素含量; 多光谱; 植被指数; 环境光校正

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0249-08

Design of Portable Crop Chlorophyll Detector with Ambient Light Correction

TANG Weijie¹ WANG Nan² LIU Guohui¹ ZHAO Ruomei¹ LI Minzan^{1,3} SUN Hong¹

(1. Key Laboratory of Smart Agriculture Systems Integration, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: Rapid acquisition of crop growth status information is essential for timely guidance of agricultural production. Based on the response mechanism of crop physiological and biochemical spectroscopy, a portable crop chlorophyll detection device based on ambient light correction was designed. The device measured reflectance spectral and ambient light spectral data with 20 nm bandwidth centered at 610 nm, 680 nm, 730 nm, 760 nm, 810 nm, and 860 nm to calculate vegetation index and predict plant chlorophyll content. The features of the device were the supplemental light when the ambient light intensity was poor and the correction of the ambient light intensity under the supplemental light condition. To evaluate the sensor performance, the sensor was tested and calibrated. Experiments showed that the maximum difference in GPS positioning was 6.2 m in latitude and 4.9 m in longitude; the correlation between the light intensity response of the six bands of the spectral sensors and the measured values of the illuminance meter exceeded 0.99; the matching coefficients of the two spectral sensors were calibrated to 0.743 and 1.035 in the 610 nm and 860 nm bands, respectively. A fitting model between the supplemental light intensity and the measurement distance in the 610 nm and 860 nm bands was established for light environment correction; chlorophyll gradient experiments were conducted using

收稿日期: 2022-06-25 修回日期: 2022-08-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(31971785)、山东省烟台市校地融合项目(2020XDRHXMPT35)、中央高校基本科研业务费项目(2022TC053)和中国农业大学研究生教改项目(JG2019004、JG202026、QYJC202101、JG202102)
作者简介: 唐伟杰(1996—),男,博士生,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: weijie@cau.edu.cn
通信作者: 孙红(1980—),女,教授,博士生导师,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: sunhong@cau.edu.cn

nonwoven fabrics, and a mathematical model of NDVI vegetation index and plant chlorophyll content was established, with a model R^2 of 0.685 under poor light environment conditions without supplemental light and a model R^2 of 0.965 under supplemental light and with correction.

Key words: chlorophyll content; multispectral; vegetation index; ambient light correction

0 引言

叶绿素是作物进行光合作用的重要色素。作物叶片叶绿素含量是判断作物光合速率,生长和营养状况的重要参数^[1-3]。传统叶绿素含量的测定是基于化学计量法,这种方法通常费时费力,而且需要对作物进行破坏性采样,影响作物的正常生长^[4]。近年来,光谱技术因其快速、无损分析的优势,在获取大田作物叶绿素方面受到了相当大的关注^[5],光谱分析是一种非破坏性的检测方法,通过测量物体中特定化学组分在特定的波段上的光吸收或反射来测定相对含量。

叶绿素中的化学键(C—H、C—O、N—H等)在特征波长的光照射下会发生振动响应,引起对特征波长光线的反射差异,进而影响光谱反射率的变化^[6-7],在红光-近红外波段(600~900 nm)范围内具有强烈吸收红光(650 nm)而反射近红外光(860 nm)并且在红边(750 nm)附近出现反射率快速变化的特性,这种特性已经被证明可以用于叶绿素含量诊断^[8-10],并以此对农业生产进行指导。

根据记录波段的数量,光谱可分为高光谱和多光谱。高光谱仪器如FieldSpec HH2型(ASD,美国)通过光栅进行分光^[11],可以采集波段325~1 075 nm的光谱信息,光谱分辨率为3 nm。高光谱数据包含了上百个波段的光谱信息,具有较高的光谱分辨率,但是数据量大,信息冗余,波段间具有较高相关性^[12-13]。多光谱检测方法对不同地面物体采用不同最优波段组合,波段数量少,波段间冗余信息少,获得的信息量最大^[14],结构简单,这使得成本大幅降低,在开发低成本便携式叶绿素含量诊断设备方面具有优势。

NDVI(Normalized difference vegetation index)与NDRE(Normalized difference red edge index)是两种常用的植被指数,通过将红色波段分别与近红外和红边波段进行组合来构建指数,针对不同生长特征和时期的作物应用不同的植被指数来指示作物生长状况^[15-17]。这些植被指数已经被广泛应用于多光谱型的便携式叶绿素检测装置并证明了其可行性。

Greenseeker Handheld(Trimble,美国)是一种利用太阳作为光源的被动式作物长势检测装置,可以获取660 nm和780 nm波段的反射光谱^[18]。CAO

等^[19]使用Crop Circle ACS(Holland Scientific,美国)获得670、730、780 nm波段作物冠层反射光谱来比较不同植被指数在预测氮含量方面的准确性。这样的商业化多光谱设备虽然种类丰富,但无法将监测模型嵌入其中,制约了其现场应用的能力。GARRITY等^[20]开发了一种轻量化基于被动式的测量装置,能够连续测量532、568、676、800 nm为中心的10 nm带宽的上下行光辐射,计算光谱反射率并估算冠层叶绿素含量。李修华等^[21]设计了以太阳光为光源基于光谱学原理的测量可见光550、650 nm和近红外766、850 nm 4波段作物冠层分析仪,通过快速检测作物冠层植被指数预测作物长势。这些基于被动式的测量方式,可以快速对大片区作物进行测量,但是由于被动式测量受到环境光照的影响,无法在较差的环境光照条件下使用,限制了使用场景。

针对被动式测量方法存在的局限,孙红等^[22]设计了主动式光源的叶绿素含量诊断仪器,通过灯珠主动发光来解决在环境光照条件差时无法测量的问题,但是该装置未解决补光距离对补光强度的影响问题,存在补光测量时对环境光没有进行校正等缺陷。因此本文以测量植被指数NDVI为例,基于多光谱测量原理针对叶绿素响应的特征波长设计一种对光环境进行校正的主动式叶绿素含量诊断装置,以期实现根据环境光照条件调整补光等级,根据测量距离对环境光进行校正,快速测量作物冠层的叶绿素含量。

1 系统开发

1.1 硬件设计

便携式作物叶营养检测装置可以完成数据的快速采集处理,其系统整体硬件结构如图1所示。主要包括主控模块、光谱传感器模块、距离传感器模块、GPS定位模块、数据存储模块、电源模块、电流电压传感器模块、显示模块和可更换的补光模块。主控模块可以控制各个传感器模块进行数据的采集,并对数据进行处理显示和存储,电源模块对整个系统进行供电,受到便携式设备体积和功耗的要求,以及对不同生长特征和生长时期的作物使用不同植被指数,使用了2个可更换的补光模块对测量对象进行补光。

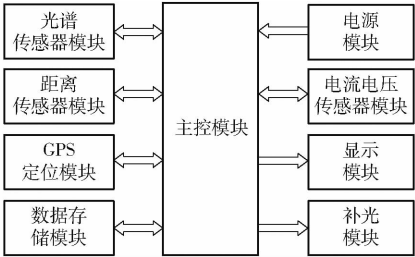


图 1 系统硬件结构

Fig.1 System hardware architecture

1.1.1 主控制器

使用 Arduino mega 2560 作为系统的主控器,控制系统中各个传感器进行数据采集、处理和存储。该主控芯片:支持 USB 与计算机直接连接进行程序的烧录调试;拥有 4 个串口,同时支持 I²C (Inter - Integrated Circuit)、SPI (Serial Peripheral Interface) 通信,可以满足该装置中所使用的传感器的连接和通信。拥有 54 个数字 I/O 端子,方便对传感器的控制,其中 12 路可用作 PWM 输出,通过 PWM 调光可以方便地控制补光 LED 的补光强度。拥有 6 个定时器,方便定时器中断的设置,支持 6 个外部中断。拥有简洁稳定的集成开发环境,开发环境为 C 语言和 C++ 语言,并提供了简单便捷的库函数。计算能力强大,可满足该研究中的各个计算。

1.1.2 光谱传感器

选用一种 6 通道光谱传感器 ASM as7263 (ASM,澳大利亚)。这种传感器具有 6 个独立的光学滤光片可以获取以 610、680、730、760、810、860 nm 为中心的 20 nm 带宽的 6 个波段光谱信息,包括了红色、红边和近红外作物叶绿素敏感范围,可以针对不同的条件灵活选择不同的波段进行测量。传感器响应曲线如图 2 所示。传感器采用 LGA 封装,提供一个内置光圈,可以控制进入传感器整列的光线。传感器内置 16 位 ADC,通过 I²C 或者串口可以快速对传感器进行控制和光谱数据获取。装置使用了 2 块相同的光谱传感器,分别放置于装置的上部与下部,位于上部的光谱传感器用于获取环境光照光谱,位于下部的光谱传感器用于获取被测物的反射光谱,反射率 R 计算公式为

$$R = \frac{E_{\text{refl}}}{E_{\text{envi}}} \tag{1}$$

式中 E_{refl} ——反射光谱传感器测量值
 E_{envi} ——环境光谱传感器测量值

1.1.3 距离传感器

测量距离对主动光源的补光强度有明显影响,获取被测物到装置的距离对补光强度进行校正至关重要。使用 VL6180X 型激光测距传感器进行距离

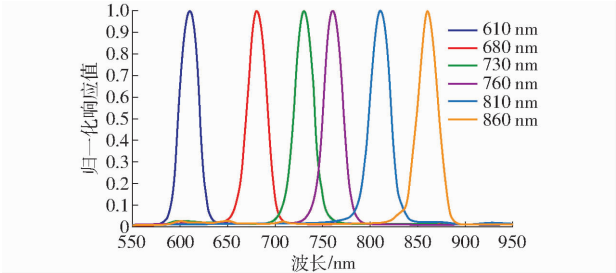


图 2 传感器 as7263 光谱响应

Fig.2 Spectral response of as7263

测量,该传感器通过发射 850 nm 的脉冲光经物体反射后回到传感器,距离计算公式为

$$L = \frac{ct}{2} \tag{2}$$

式中 L ——距离 c ——光速
 t ——光的飞行时间

传感器的标称测量精度为 0.1 mm,测量距离为 0 ~ 150 mm,主控模块通过 I²C 总线可以获取距离数据。

1.1.4 GPS 定位模块

为了实现农田区块级作物叶绿素含量分布的可视化,植株的地理信息位置需要被同时记录并保存。使用了 ATK - S216F - BD 型 GPS/北斗模块来获取地理信息坐标。该模块体积小,性能优异,定位精度在 2 ~ 2.5 m,有 1、2、4、5、8、10、20 Hz 7 种不同的更新频率。可以通过串口进行通信获取数据和设置参数,并且将参数保存到内部的 FLASH 存储器中。拥有 IPX 接口,可以连接各种有源天线,方便有效提升信号接收效果。自带可充电后备电池,可在掉电后维持 0.5 h 左右的星历数据,实现短时间掉电后快速定位。使用 NMEA - 0183 协议,选择其中的 \$GNRMC (推荐定位信息) 可以获取 UTC (Universal time coordinated) 时间、UTC 日期、经纬度、定位状态等所需信息。

1.1.5 LED 补光灯

对于不同生长特征和不同生长时期的作物,使用不同的植被指数可以获得较好的测量精度,由于 NDVI 较为广泛的应用场景,可以应用于作物冠层生长不特别密集,作物生长的前中期和作物生长不密集的后期^[23],所以以测量植被指数 NDVI 为例,使用了符合植物叶绿素反射特征波段(630 nm 附近的红光波段,860 nm 附近的近红外波段)的红光补光 LED 灯和近红外补光 LED 灯,单个补光灯珠功率为 6 W,总功率 12 W。用补光灯照射漫反射白板,使用 ASD FieldSpec HH2 型光谱仪 (ASD Inc., 美国) 测量灯珠的光谱,其光谱曲线如图 3 所示,红光补光 LED 的发光光谱在 630 nm 处取最大值,并

在波段 630 ~ 640 nm 范围内都有较高分布。近红外补光 LED 在以 850 nm 处取最大值,并在波段 820 ~ 860 nm 范围内有较高分布,因此计算构成 NDVI 指数的波段选择与补光灯峰值靠近的 610 nm 和 860 nm。补光灯可以由主控器通过 PWM 信号调整 4 个不同的补光强度。

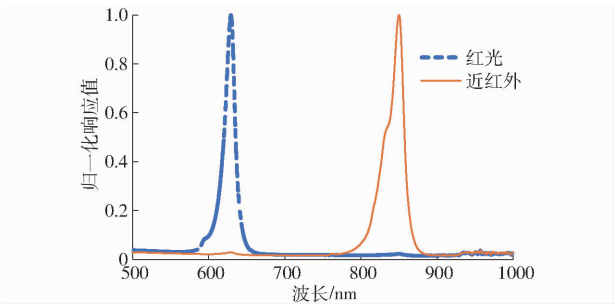


图 3 LED 光谱曲线
Fig. 3 LED spectral curves

1.1.6 其他模块

使用 3.7 V 6 700 mA·h 可充电锂电池作为电源为系统进行供电,使用 INA219 型电流电压传感器,该传感器可以感知 0 ~ 26 V 总线电压,通过 I²C 与主控模块通信,用于供电电压和电流的监测,监控电池剩余电量。

使用分辨率为 128 × 64 的低功耗 OLED 显示屏作为显示模块,该显示屏通过 I²C 总线与主控模块通信,显示系统状态和测量结果。使用 SD 卡拓展模块结合 SD 卡对测量的数据进行存储。

1.2 软件设计

1.2.1 需求分析

据研究的目标,装置能够采用被动式测量或主动被动混合式测量,因此需要完成:对系统和传感器初始化和控制,根据环境光条件选择测量模式,获取传感器数据并进行计算,显示系统状态和测量结果,数据存储。

1.2.2 软件总体流程

软件总体流程如图 4 所示,分为:装置初始化、待机等待、测量。完成装置初始化后进入待机,等待外部触发以开始测量。软件使用 C++ 语言编写。

1.2.3 测量流程

测量过程是该装置的核心过程,其流程如图 5 所示。过程中设计了防误触功能,在待机时如果按下开始测量按钮将再次询问是否开始测量,按下确定键将进入测量流程,主控依次与各个传感器进行通信,获取传感器数据。程序根据测量环境光照的光谱传感器数据判断是否需要开启补光,并自动调节补光等级。完成测量后将计算测量结果并询问是否保存,若需要保存则将数据打包存储至 SD 卡中。

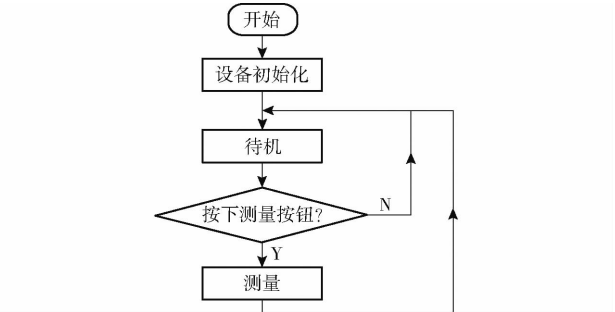


图 4 软件总体流程图
Fig. 4 Overall software flow chart

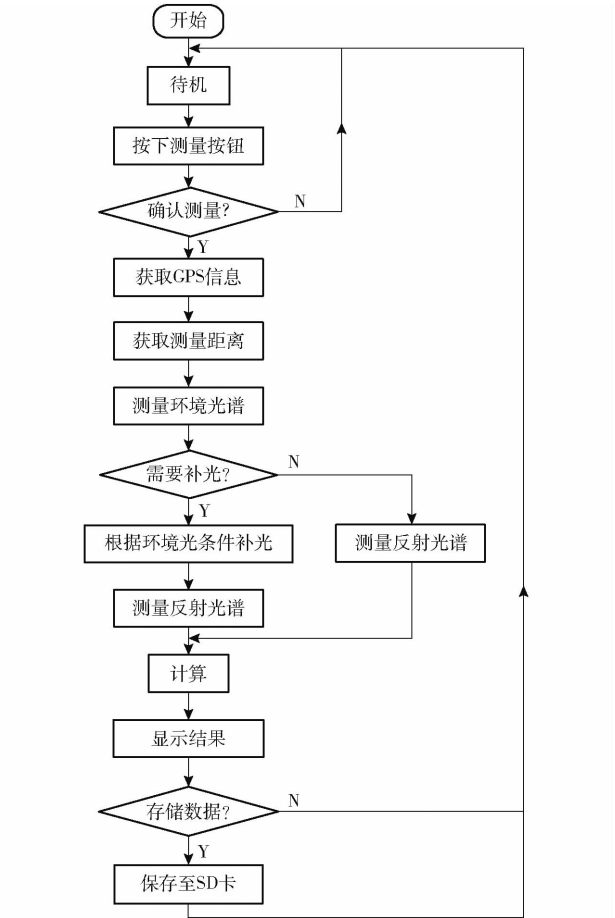


图 5 测量流程图
Fig. 5 Measurement flow chart

2 系统性能测试

2.1 测试方法

2.1.1 光谱传感器线性度测试

将装置放置于搭建好的黑箱中,底部放置标称反射率 0.99 的漫反射白板,光谱传感器距离白板 13 cm,在正下方放置 Digital Lux Meter AS823 型照度计探头,照度计放置在黑箱外。调整卤素灯强度使照度计读数从 500 ~ 5 000 lx,每间隔 500 lx 测量 1 组 10 个数据并取平均值。

2.1.2 距离传感器线性度与精度测试

将装置与目标板平行放置,并逐步移动装置使

二者间距从 20 mm 移动到 150 mm,每隔 10 mm 获取一次距离传感器数值同时记录游标卡尺读数。

2.1.3 GPS 定位稳定性测试

在户外开阔环境下,固定装置,从 15:53 测量至 19:29,每间隔 3 min 测量一次 GPS 定位,持续测量 213 min,计算 GPS 定位漂移误差。

2.2 测试结果

2.2.1 光谱传感器线性度结果

光谱传感器测量值随光照强度的变化如图 6 所示,对数据散点进行回归,光谱传感器 6 个通道的决定系数都大于 0.99,说明光谱传感器具有良好的线性度。

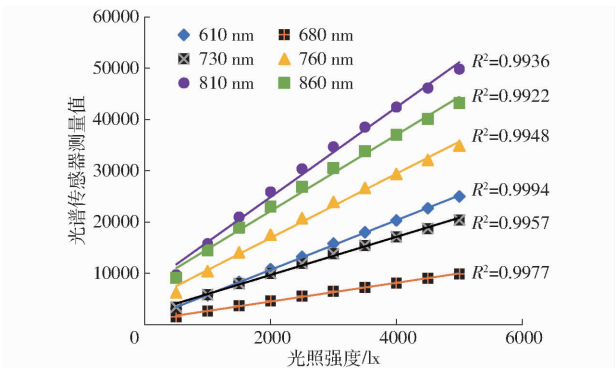


图 6 光谱传感器测量值随光照强度的响应

Fig.6 Response of spectral sensors with light intensity

2.2.2 距离传感器线性度与精度结果

实验获取 14 组距离,其结果如表 1 所示,以游标卡尺测量值作为真值,计算传感器测量值与真值间的相关系数为 0.999,平均误差为 0.31 mm,说明距离传感器具有与良好的线性度和精度。

表 1 距离传感器测量结果

Tab.1 Distance sensor measurement results			mm
游标卡尺测量值	距离传感器测量值	误差	
20.00	20.8	0.8	
30.00	30.0	0	
40.00	40.4	0.4	
50.00	49.9	0.1	
60.00	59.8	0.2	
70.00	70.1	0.1	
80.00	80.5	0.5	
90.00	90.0	0	
100.00	100.4	0.4	
110.00	109.7	0.3	
120.00	119.4	0.6	
130.00	130.5	0.5	
140.00	140.3	0.3	
150.00	150.2	0.2	

2.2.3 GPS 定位稳定性测试结果

实验共采集 70 组定位数据,去除前 3 组 GPS 搜星过程的数据,共 67 组可用数据,其经度和纬度

数据随时间变化的结果如图 7 所示。定位纬度读取的最大值为 4 000.314 8,转换后为 40°00′18.888″N,读取最小值为 4 000.311 4,转换后为 40°00′18.684″N,纬度最大差值为 0.204″,即最大漂移约为 6.2 m。经度读取最大值为 11 621.023 7,转换后为 116°21′1.422″E,读取最小值为 11 621.020 2,转换后为 116°21′1.212″E,经度最大差值为 0.210″,即最大漂移约为 4.9 m。

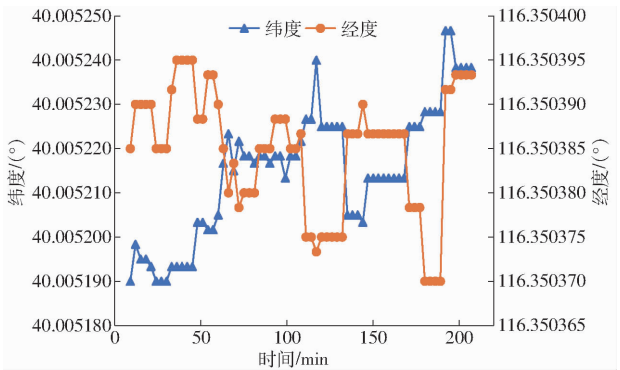


图 7 GPS 定位随时间漂移曲线

Fig.7 GPS positioning drift graph over time

3 系统标定校正与叶绿素梯度实验

3.1 系统标定

3.1.1 双光谱传感器线匹配

在晴朗的开阔室外条件下,使用脚架固定好装置,在装置正下 13 cm 处放置一块标称反射率为 99% 的漫反射白板,从 15:53 测量至 19:29,每隔 3 min 采集一次光谱数据,持续测量 213 min,每次采集 10 个数值并记录平均值。以测量环境光照的传感器为基准,计算匹配系数,计算式为

μ_{band} = 1/71 ∑_{i=1}⁷¹ (n_i/m_i) (3)

式中 μ_{band}——不同波段的匹配系数
n_i——对应波段环境光谱传感器测量值
m_i——对应波段作物反射光谱传感器测量值

3.1.2 补光强度标定与验证

将装置放置于暗箱中,固定在支架上,在装置正下方放置标称反射率为 0.99 的漫反射白板。使用游标卡尺控制装置与白板距离 50 ~ 210 mm,每移动 10 mm 获取一组 610 nm 和 860 nm 波段 4 个补光等级的光谱数据并记录游标卡尺的读数,使用多项式回归对数据进行拟合,建立拟合模型。对建立的拟合模型进行验证,随机在 3 个不同距离上测量的 4 个补光强度下的实测值并计算模型预测值与测量值的误差。

3.1.3 环境光照强度校正

在环境光照条件较差的条件下,装置开启主动

补光灯进行补光,此时总环境光照强度为测量环境光谱的传感器数值加补光强度拟合模型计算数值,反射率计算式为

$$R = \frac{E_{\text{refl}}}{E_{\text{envi}} + E_{\text{sup}}}$$

(4)

式中 E_{sup} ——拟合模型计算的补光强度

3.2 无纺布叶绿素梯度实验

采集新鲜的绿色植物树叶,将树叶剪碎,配置丙酮、无水乙醇比例为 2:1 的萃取液对树叶叶绿素萃取 24 h。将萃取液分 10 个梯度进行稀释,使用岛津 UV2450 型紫外分光光度计(Shimadzu Ltd., 日本)测量 10 个梯度溶液 649 nm 和 665 nm 波段的吸光度,计算叶绿素含量真值^[24],计算式为

$$C_a = 13.95D_{665} - 6.88D_{649}$$

(5)

$$C_b = 24.96D_{649} - 7.32D_{665}$$

(6)

$$C_t = C_a + C_b$$

(7)

$$NDVI = \frac{R_{860} - R_{610}}{R_{860} + R_{610}}$$

(8)

式中 C_a ——叶绿素 a 的质量浓度,mg/L

C_b ——叶绿素 b 的质量浓度,mg/L

C_t ——叶绿素总和,mg/L

R_{860} 、 R_{610} ——860、610 nm 反射率

D_{649} 、 D_{665} ——649、665 nm 波段的吸光度

将萃取液浸染无纺布并晾干以模拟不同叶绿素含量的叶片见图 8。在室内环境光线较差的条件下使用装置分别进行强制关闭补光测量和正常开启补光测量,获取传感器 610 nm 波段数据和 860 nm 波段数据,并分别根据式(1)、(4)、(8)计算反射率和植被指数 NDVI。对 NDVI 与叶绿素含量建立线性回归模型,使用决定系数 R^2 衡量模型拟合程度,数值越接近 1,模型拟合精度越高。

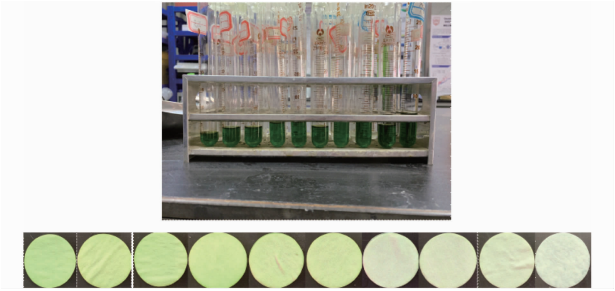


图 8 萃取叶绿素并浸染无纺布

Fig. 8 Chlorophyll extraction and impregnation of non-woven fabrics

3.3 结果

3.3.1 双光谱传感器线匹配结果

连续采集了 70 组共 140 个数据点,结果如图 9 所示,横轴为测量环境光照的传感器数值,纵轴为测量反射光的传感器数值,可以看出,回归决定系数在

0.99 以上,说明 2 个传感器之间的线性度较好,但是在同一光照条件下响应不同。根据式(3)计算 610 nm 和 860 nm 波段的匹配系数分别为 $\mu_{610} = 0.743$, $\mu_{860} = 1.035$ 。

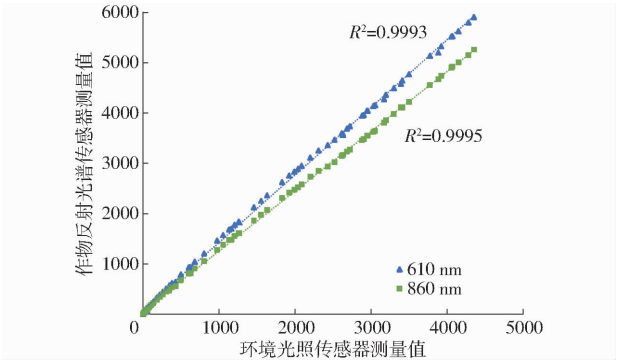


图 9 双光谱传感器响应

Fig. 9 Dual spectrum sensor response

3.3.2 补光强度标定与验证结果

实验获取 144 个数据,其中 610 nm 波段 72 个,860 nm 波段 72 个,图 10 为 610 nm 和 860 nm 波段光谱传感器测量值随补光距离变化曲线。可以看出,补光强度随着补光距离的增加先升高后再下降,其中 610 nm 波段的补光强度在 120 ~ 160 mm 区间内较强,补光效果较好;860 nm 波段的补光强度在 110 ~ 150 mm 区间内较强,补光效果较好,因此推荐装置的补光距离处于 110 mm 至 150 mm 间。建立补光强度与补光距离的多项式拟合模型为

$$\begin{aligned} y_{610,1} &= 1.098 \times 10^{-6}x^4 - 5.963 \times 10^{-4}x^3 + \\ &\quad 1.065 \times 10^{-1}x^2 - 6.674x + 159.3 \\ y_{610,2} &= 2.171 \times 10^{-6}x^4 - 1.179 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 2.105 \times 10^{-1}x^2 - 13.17x + 311.8 \\ y_{610,3} &= 3.157 \times 10^{-6}x^4 - 1.171 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 3.067 \times 10^{-1}x^2 - 19.18x + 452.8 \\ y_{610,4} &= 3.906 \times 10^{-6}x^4 - 2.134 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 3.803 \times 10^{-1}x^2 - 23.10x + 530.2 \\ y_{860,1} &= 2.197 \times 10^{-6}x^4 - 1.518 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 1.959 \times 10^{-1}x^2 - 10.88x + 264.5 \\ y_{860,2} &= 4.544 \times 10^{-6}x^4 - 2.403 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 4.097 \times 10^{-1}x^2 - 23.28x + 567.2 \\ y_{860,3} &= 6.549 \times 10^{-6}x^4 - 3.453 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 5.845 \times 10^{-1}x^2 - 32.52x + 783.8 \\ y_{860,4} &= 8.651 \times 10^{-6}x^4 - 4.566 \times 10^{-3}x^3 + \\ &\quad 7.742 \times 10^{-1}x^2 - 43.23x + 1041 \end{aligned}$$

其中拟合模型 $y_{\text{band},i}$ 为对应波段在补光等级 i 下的补光强度, x 为补光距离。

对建立的拟合模型进行验证,结果如表 2 所示,其中 610 nm 波段的预测值与实际值平均误差为 9.36%,860 nm 波段的预测值与实际值平均误差为 3.33%。

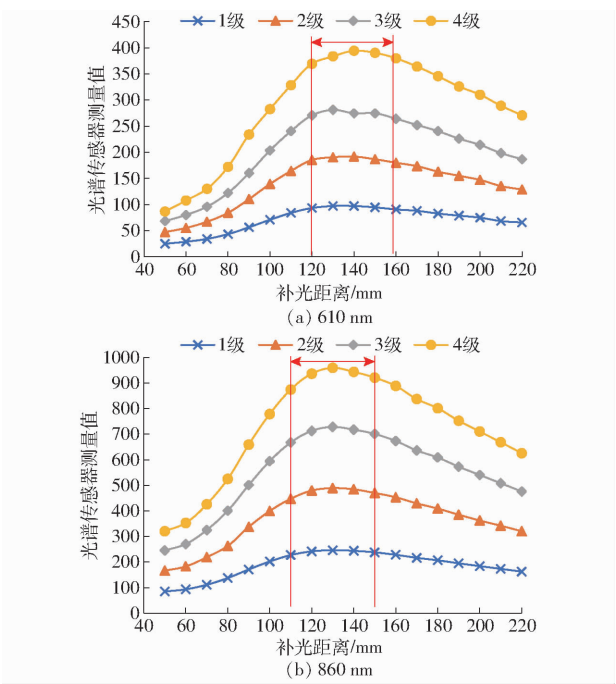


图 10 补光强度与补光距离结果

Fig. 10 Results of supplemental light intensity and distance

表 2 拟合模型误差

Tab.2 Error of fitted model

补光等级	补光距离/mm	610 nm			860 nm		
		实测值	计算值	误差/%	实测值	计算值	误差/%
4	128	392.8	377.4	3.92	942.5	938.7	0.40
3		298.2	269.4	9.66	714.1	714.2	0.01
2		211.5	185.1	12.48	480.8	480.2	0.12
1		105.1	94.1	10.47	241.6	242.7	0.46
4	97	290.3	265.9	8.41	783.5	730.7	6.74
3		210.2	190.5	9.37	592.1	557.2	5.89
2		143.2	131.1	8.45	397.1	373.0	6.07
1		73.6	67.0	8.97	200.9	190.0	5.43
4	110	357.3	322.4	9.77	879.1	842.8	4.13
3		257.5	231.0	10.29	666.2	641.9	3.65
2		176.0	158.8	9.77	447.3	430.7	3.71
1		90.7	80.9	10.80	226.1	218.5	3.36

3.3.3 无纺布叶绿素梯度实验结果

在室内较差环境光条件下使用装置分别关闭补光采集和正常自动进行补光采集浸染了叶绿素萃取液的无纺布。实验共采集 20 组数据,对反射率数据与叶绿素含量进行的相关性分析其结果如表 3 所示,在开启补光并对环境光照进行校正的情况下,610 nm 波段反射率与叶绿素含量的相关性增强了。根据式(8)计算 NDVI 指数并与叶绿素含量建立模

型,结果如图 11 所示,可以看出在强制关闭补光灯的情况下拟合直线的决定系数 R^2 为 0.685,精度较低,在设备正常开启补光并进行校正后拟合决定系数 R^2 达到 0.965,得到了大幅度提高。说明设备在光照条件不佳的条件下主动补光进行数据采集可以很好地提高装置诊断叶绿素含量的精度。

表 3 反射率与叶绿素含量相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of reflectance and chlorophyll content

补光情况	610 nm 相关系数	860 nm 相关系数
关闭补光	-0.908	0.053
自动补光	-0.987	-0.262

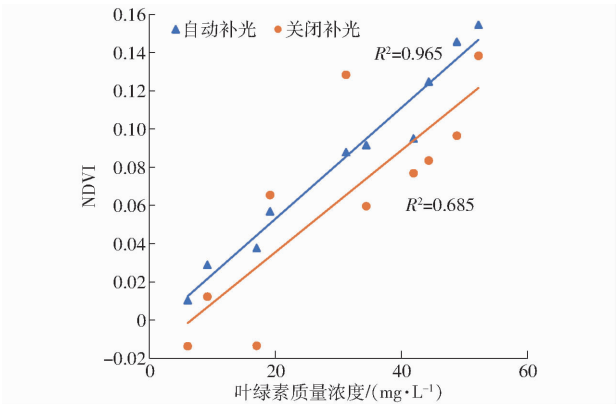


图 11 NDVI 与叶绿素含量模型结果

Fig. 11 Model results of NDVI and chlorophyll content

5 结论

- (1)设计了基于光环境作物叶绿素含量检测装置,建立了补光强度与测量距离之间的拟合模型,实现了主动补光并对补光条件下光环境条件进行校正。对拟合模型进行了验证,验证结果为 610 nm 波段计算值与测量值平均误差为 9.36%,860 nm 波段计算值与测量值平均误差为 3.33%。
- (2)进行了光谱传感器的标定实验,对 2 个光谱传感器进行了标定匹配,得出了 2 个传感器在 610 nm 波段和 860 nm 波段的匹配系数为 0.743 和 1.035。
- (3)进行了无纺布叶绿素实验,在光照条件不足条件通过主动补光并对光环境进行校正提高了光谱数据与叶绿素含量间的相关系数,建立了 NDVI 指数与叶绿素含量间的模型,模型精度 R^2 由未补光校正条件下的 0.685 提升到 0.965。

参 考 文 献

[1] LIMANTARA L, DETTLING M, INDRAWATI R, et al. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables[J]. Procedia Chemistry, 2015,14: 225 – 231.

[2] ZHUANG J, ZHOU L, WANG Y, et al. Nitrogen allocation regulates the relationship between maximum carboxylation rate and chlorophyll content along the vertical gradient of subtropical forest canopy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021,307:

108512.

- [3] ALI M M, BACHIK N A, MUHADI N A, et al. Non-destructive techniques of detecting plant diseases: a review[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2019,108: 101426.
- [4] WANG Z, CHEN J, FAN Y, et al. Evaluating photosynthetic pigment contents of maize using UVE – PLS based on continuous wavelet transform[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020,169: 105160.
- [5] PADILLA F M, PEÑA-FLEITAS M T, GALLARDO M, et al. Proximal optical sensing of cucumber crop N status using chlorophyll fluorescence indices[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016,73: 83 – 97.
- [6] CHEN X, DONG Z, LIU J, et al. Hyperspectral characteristics and quantitative analysis of leaf chlorophyll by reflectance spectroscopy based on a genetic algorithm in combination with partial least squares regression[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020,243: 118786.
- [7] DAUGHTRY C S T, WALTHALL C L, KIM M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000,74(2): 229 – 239.
- [8] XIAOBO Z, JIYONG S, LIMIN H, et al. In vivo noninvasive detection of chlorophyll distribution in cucumber (*Cucumis sativus*) leaves by indices based on hyperspectral imaging[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011,706(1): 105 – 112.
- [9] 张伏, 张亚坤, 毛鹏军, 等. 植物叶绿素测量方法研究现状及发展[J]. *农机化研究*, 2014,36(4): 238 – 241.
ZHANG Fu, ZHANG Yakun, MAO Pengjun, et al. Status and development of measuring method in plant chlorophyll content [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014,36(4): 238 – 241. (in Chinese)
- [10] 田永超, 朱艳, 姚霞, 等. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术[J]. *生态学杂志*, 2007(9): 1454 – 1463.
TIAN Yongchao, ZHU Yan, YAO Xia, et al. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007(9): 1454 – 1463. (in Chinese)
- [11] JEONG G, BAE W, JEONG D. Review of CMOS integrated circuit technologies for high-speed photo-detection[J]. *Sensors*, 2017,17(9):1962.
- [12] MERZLYAK M, GITELSON A, CHIVKUNOVA O, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. *Physiologia Plantarum*, 1999,106: 135 – 141.
- [13] SONG D, GAO D, SUN H, et al. Chlorophyll content estimation based on cascade spectral optimizations of interval and wavelength characteristics[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021,189: 106413.
- [14] LI D, LI C, YAO Y, et al. Modern imaging techniques in plant nutrition analysis: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020,174: 105459.
- [15] LU S, LU F, YOU W, et al. A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons[J]. *Plant Methods*, 2018,14(1): 15.
- [16] YAO X, WANG N, LIU Y, et al. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery[J]. *Remote Sensing*, 2017,9(12): 1304.
- [17] YUE J, YANG G, TIAN Q, et al. Estimate of winter-wheat above-ground biomass based on UAV ultrahigh-ground-resolution image textures and vegetation indices[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019,150: 226 – 244.
- [18] ALI A M, THIND H S, VARINDERPAL-Singh, et al. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded rice using GreenSeeker™ optical sensor[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015,110: 114 – 120.
- [19] CAO Q, MIAO Y, WANG H, et al. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with crop circle multispectral active canopy sensor[J]. *Field Crops Research*, 2013,154: 133 – 144.
- [20] GARRITY S R, VIERLING L A, BICKFORD K. A simple filtered photodiode instrument for continuous measurement of narrowband NDVI and PRI over vegetated canopies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010,150(3): 489 – 496.
- [21] 李修华, 张锋, 李民赞, 等. 四波段作物冠层分析仪设计[J]. *农业机械学报*, 2011,42(11): 169 – 173.
LI Xiuhua, ZHANG Feng, LI Minzan, et al. Design of a four-waveband crop canopy analyzer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(11): 169 – 173. (in Chinese)
- [22] 孙红, 邢子正, 张智勇, 等. 基于 RED – NIR 的主动光源叶绿素含量检测装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊): 175 – 181.
SUN Hong, XING Zizheng, ZHANG Zhiyong, et al. Design and experiment of chlorophyll content detection device for active light source based on RED – NIR[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(Supp.): 175 – 181. (in Chinese)
- [23] JOHANSEN B, TØMMERVIK H. The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014,27: 20 – 30.
- [24] TANG W, WANG N, ZHAO R, et al. Chlorophyll detector development based on snapshot-mosaic multispectral image sensing and field wheat canopy processing[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022,197: 106999.