

基于 RED – NIR 的主动光源叶绿素含量检测装置设计与试验

孙 红¹ 邢子正¹ 张智勇¹ 龙耀威¹ 李民赞¹ ZHANG Qin²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 华盛顿州立大学精细农业及农业自动化研究中心, 普尔曼 WA 99350)

摘要: 为了无损和高效地检测作物叶绿素含量,设计了一种采用主动光源的双波长便携式叶绿素含量检测装置,获取作物在红色范围 660 nm 附近的光谱深吸收和近红外 850 nm 附近的光谱强反射特征。采集作物叶片的反射光信号,经转换、调制和放大后,利用灰度标准板拟合反射率,660 nm 和 850 nm 拟合的校正模型 R^2 分别为 0.993、0.979。光源稳定性与抗干扰性测试结果显示,660 nm 和 850 nm 光源的稳定性均方差分别为 0.007 9 和 0.004 4,误差率分别为 2.378% 和 1.223%;抗干扰性的均方差分别为 0.009 9 和 0.018 7,误差率分别为 2.000% 和 4.360%。通过叶绿素浸提溶液配比,设计了叶绿素梯度与双波长反射率的相关性试验,结果显示,660 nm 和 850 nm 与叶绿素浓度相关系数分别为 -0.919 和 0.272。660 nm 附近叶绿素对光谱有深吸收的特征,将其作为主要测试波长;850 nm 附近是叶片结构和以环境光学响应为主,反射光与叶绿素相关性不强,将其作为检测的参比波长。以田间玉米苗期植株为试验对象,利用双波长采集作物反射率,计算归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)、比值植被指数(RVI)和土壤调整型植被指数(SAVI),其与 SPAD 仪器测量值的相关系数 r 分别为 0.892、0.846、0.867、0.883。基于 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 建立 SPAD 多元线性回归模型,其决定系数 R^2 为 0.831。利用该装置提供的模型嵌入功能导入诊断模型可直接输出叶绿素诊断结果,为作物叶绿素含量快速检测提供支持。

关键词: 叶绿素含量; 光学检测; 主动光源; 植被指数; 光谱分析

中图分类号: O433.4; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0175-07

Design and Experiment of Chlorophyll Content Detection Device
for Active Light Source Based on RED – NIR

SUN Hong¹ XING Zizheng¹ ZHANG Zhiyong¹ LONG Yaowei¹ LI Minzan¹ ZHANG Qin²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Center for Precision and Automated Agricultural System, Washington State University, Pullman WA 99350, USA)

Abstract: In order to monitor the chlorophyll content of crop leaves quickly and without damage, a portable chlorophyll content monitoring device was designed with active light. Dual wavelengths were involved with the deep absorption of crop at 660 nm and strong reflection at 850 nm. After the conversion, modulation and amplification of the signal, the signal indicated the reflected light intensity of crop was obtained. The calculated models of spectral reflectance at dual wavelengths were fitted by using the calibration with four gray board, and the R^2 were 0.993, 0.979 at 660 nm and 850 nm, respectively. The stability and the anti-interference tests of the light source were carried out. The results showed that the mean square errors of the stability test data at 660 nm and 850 nm were 0.007 9 and 0.004 4, and the error rates were 2.378% and 1.223%, respectively. The mean variances of anti-interference were 0.009 9 and 0.018 7, the error rates were 2.000% and 4.360%, respectively. The correlation test of chlorophyll gradient and dual-wavelength reflectance was designed. The results showed that the correlation coefficients of dual-wavelength and chlorophyll concentration based on 660 nm and 850 nm were -0.919

收稿日期: 2019-04-08 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300600-2016YFD0300606、2016YFD0300600-2016YFD0300610)、国家自然科学基金项目(31501219)、“海外名师”高端外国专家项目(MS2017ZGNY004)和中国农业大学研究生实践教学基地建设项目(ZYXW037)

作者简介: 孙红(1980—),女,副教授,博士生导师,主要从事农田信息获取技术研究,E-mail: sunhong@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

and 0.272, which reflected the strong absorption characteristics of chlorophyll in the vicinity of 660 nm. Meanwhile, 850 nm was selected as reference band with a low correlation coefficient between reflected light and chlorophyll. Furthermore, the field experiment was conducted to detect the chlorophyll content of maize canopy. The vegetation indices were calculated, including NDVI, DVI, RVI, SAVI dual-wavelength spectral vegetation index. The correlative coefficients r of NDVI, DVI, RVI, SAVI and SPAD were 0.892, 0.846, 0.867 and 0.883, respectively. The linear models of NDVI, DVI, RVI and SAVI with SPAD were established, and the model determination coefficient R^2 was 0.831. Subsequently, the model embedding function provided by the device can be used to further improve its field application ability in crop chlorophyll content detection.

Key words: chlorophyll content; optical detect; active light; vegetation index; spectral analysis

0 引言

叶绿素含量是作物生长的重要营养指标,是实现作物精确管理的重要依据。传统的化学测量手段需要对作物采样叶片进行研磨与萃取操作,耗时耗力,不利于快速检测。光谱学是一种无损、快捷的作物生长信息检测手段,通过测量作物叶片的光谱植被指数检测叶片叶绿素含量已得到广泛的应用^[1-3]。

光谱植被指数众多,其中针对作物在红光波段 (RED, 600 ~ 700 nm) 深吸收和近红外波段 (Near - Infrared, NIR, 750 ~ 950 nm) 强反射的光谱特性,采用双波长计算 NDVI (Normalized difference vegetation index)、DVI (Difference vegetation index)、RVI (Ratio vegetation index) 和 SAVI (Soil adjust vegetation index) 等指数被证明是检测叶绿素水平的重要参数,并指导开发了一系列田间作物植被指数光谱学检测设备^[4-5]。

按照光源提供的属性,作物光谱植被指数测量仪器主要包含被动光源式和主动光源式两类^[6-7]。被动光源式以中国农业大学研制的 550、650、766、850 nm 4 波段 NDVI 仪^[8]和南京农业大学开发的 720、810 nm 两波段便携式作物生长监测诊断仪^[9]为代表,其利用太阳光,光源易于获得,但是受到天气与环境的影响较大,且测量的时间窗口短。GreenSeekers 采用 671 nm 和 780 nm 双波段便携式作物生长检测设备计算作物的 NDVI^[10-11], CropCircle 使用 670、730、780 nm 3 个波段计算作物的 NDVI^[12-13],这些主动光源式叶绿素检测仪,通过集成发光光源,利用特征光的辐射,可以消除环境与天气动态的干扰,并可延长夜间测量时间,在农业生产实践中受到了重视^[14]。

上述作物植被指数检测设备主要以获取 NDVI 指数为主。一方面,田间应用研究指出,NDVI 植被指数在作物封垄或高氮施肥处理下存在饱和现象,而获取 DVI、RVI 等多种植被指数是提供作物长势

评估与差异化分析的途径^[15]。另一方面,单一植被指数数据输出可以用于叶绿素含量的检测,但是当检测模型确立后,无法嵌入模型直接输出叶绿素含量指标,降低了设备应用的效率。因此,开发基于 RED 与 NIR 特征光谱探测的组合植被指数检测装置,提供多植被指数输出与模型可编程嵌入接口的便携式应用装置,可满足不同作物叶绿素含量分析的应用需求,具有实用价值^[16-18]。

本文基于作物光谱检测原理,设计一种主动光源式叶绿素含量检测装置,其硬件部分用于测量作物叶片的 RED 与 NIR 双波段反射光学信号,经光信号转换、信号放大、信号滤波、反射率校正,软件计算并输出 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 多种双波长计算植被指数。软件部分同时提供作物模型嵌入软件接口。以玉米为对象开展田间测试,建立玉米苗期叶绿素含量诊断模型,嵌入后可选择输出叶绿素含量指标值,为作物生长状态快速无损检测研究与应用提供支持。

1 系统原理与总体设计

1.1 系统原理

根据近红外光谱分析原理,物质分子吸收某一波长处的电磁波辐射能量,其反射光谱曲线则存在强的吸收谷特征,因此,可通过计算反射率来检测该吸光物质的浓度。根据 Kubelka - Munk 方程,固体物质的相对反射率^[19]为

$$R(\lambda) = \frac{I_t(\lambda)}{I_s(\lambda)}$$

式中 $I_t(\lambda)$ ——待测样品反射光信号
 $I_s(\lambda)$ ——标准板反射光信号
 $R(\lambda)$ ——相对反射率
 λ ——波长

由植物光谱特性可知,当光作用于作物叶片时,叶绿素在红光 (600 ~ 700 nm) 波段具有强吸收,在近红外 (750 ~ 950 nm) 波段植物生理结构特性呈较强的反射,因而对红光波段和近红外波段叶片反射

光进行分析,计算作物叶片的植被指数,可以用于检测作物叶片叶绿素含量。

1.2 总体设计

由于被动光源装置依赖太阳光辐射,易受天气的影响,本设计采用主动光源的方式,光源选取以红光波段 660 nm 和近红外波段 850 nm 为中心波长的 LED(Light emitting diode)。装置主要由 STM32F103 主控芯片、光源发射模块、光信号接收模块、光信号调制电路、无线传输模块组成,设计系统原理框图如图 1 所示,系统整体设计路线如图 2 所示。其中,主控芯片控制光源发射模块发出 660 nm 红光和 850 nm 近红外光,经作物叶片反射后由光信号接收模块采集,利用 I/V 转换将光信号转换为电信号,并通过电压放大电路和信号滤波电路对信号进行滤波放大。应用时,采用 4 阶灰度板标定,并建立校正模型,从而计算出 660 nm 和 850 nm 反射率。然后,由植被指数公式计算出 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 参数,通过无线传输模块将计算的数据传输到计算机端。

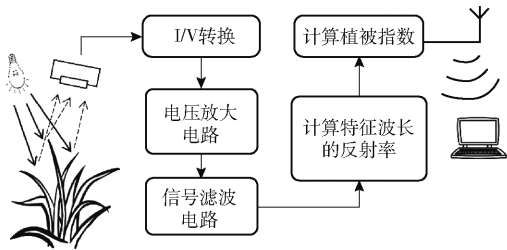


图 1 系统原理框图
Fig. 1 Diagram of system schematic

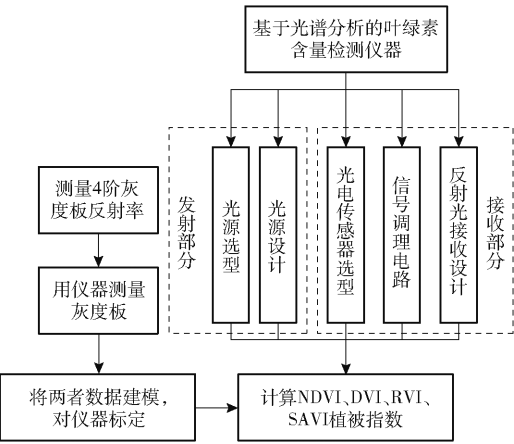


图 2 系统整体设计路线
Fig. 2 System overall design

2 系统设计

2.1 硬件设计

硬件主要由光源发射模块、光信号接收转换模块、信号调理电路、无线传输模块和电源模块构成。

2.1.1 光源发射模块

主动光源采用功率为 1 W、波长为 660 nm 和

850 nm 的 LED,为了更好地区分太阳光和装置发射的特征光,光源发射模块通过 PWM(Pulse width modulation)对发射光进行 1 kHz 的频率调制。

2.1.2 光信号接收转换模块

在光源的接收设计上采用了双通道方案,采用 2 个光电传感器进行反射光的接收,光源发射模块发出的 660 nm 和 850 nm 波长的光线经过作物叶片反射后,通过光电传感器对光信号进行接收,并将光信号转换为电信号。为了汇聚入射光线,增加接收模块的接收光强,同时增加入射光的入射角度,增大反射光的接收面积,在两个波长的光源接收模块的光通道上增加凸透镜,光源接收模块如图 3 所示。

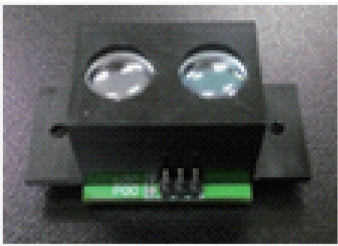


图 3 光源接收模块
Fig. 3 Light source receiving module

2.1.3 信号调理电路

信号调理电路由 I/V 转换电路、放大电路和直流滤波电路组成。光源接收模块将反射光转换为电信号并输出,由于输出的电信号是电流信号,不便于后续的放大和计算,要通过 I/V 转换电路将电流信号转换为电压信号。放大电路将转换后的电压信号进行放大。直流滤波电路使用二极管和电容将直流截止,使具有一定频率的电压信号通过滤波电路,并使用主控芯片通过 ADC(Analog-to-digital converter)转换测量出滤波电路的输出电压^[20]。

(1) I/V 转换电路

I/V 转换电路的核心为低噪声运放 TLC2201 芯片, TLC2201 能够得到双极型放大器的直流精度和极低的噪声性能,图 4 为 I/V 转换电路原理图。运算放大器 TLC2201 芯片利用虚短路和虚断路原理将电流信号转换为电压信号,并进行第 1 次输出信号的放大。由运放负端虚地得

$$IR_3 = I_1R_5 \tag{1}$$

$$I_2 = I_1 + I \tag{2}$$

$$U_{out} = -(R_4I_2 + I_1R_5) \tag{3}$$

式中 U_{out} ——输出电压 $I、I_1、I_2$ ——节点电流
由式(1)~(3)得

$$U_{out} = -I(R_3 + R_4 + R_3R_4/R_4) \tag{4}$$

(2) 放大电路

NE5532 芯片对电压信号进行二次放大。

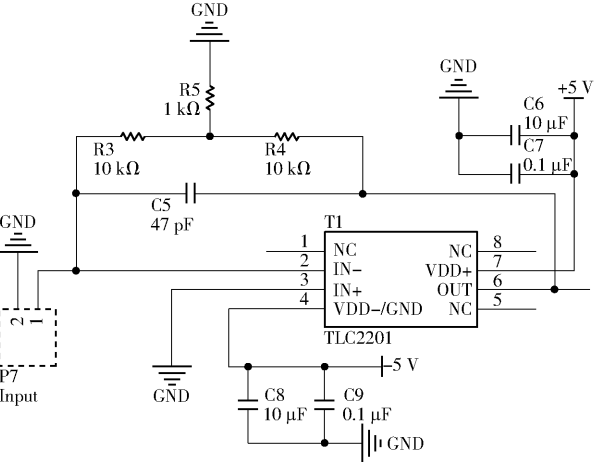


图 4 I/V 转换电路原理图
Fig. 4 Schematic of I/V conversion circuit

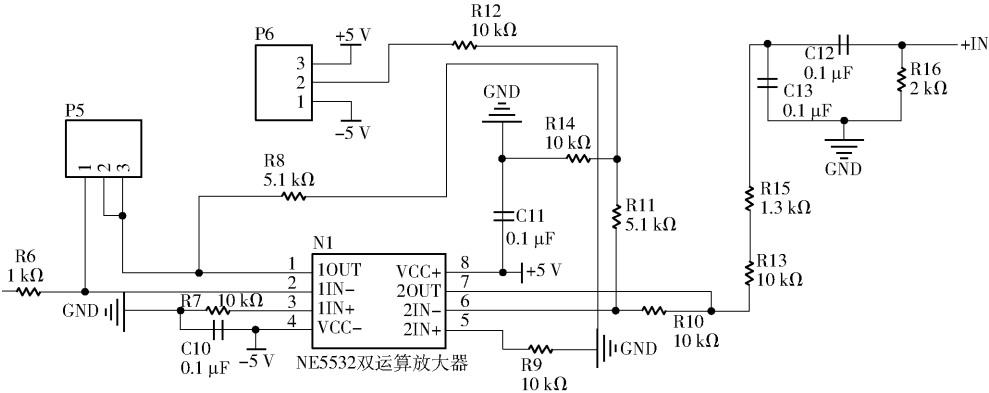


图 5 放大电路原理图
Fig. 5 Schematic of amplifier circuit

(3)直流滤波电路

光电探测器接收到的自然光为直流电信号,接收到的反射光为经过 PWM 调制后的频率电信号,通过直流滤波可以将直流电信号去除,保留频率电信号,从而消除太阳光的影响。

2.1.4 无线传输模块

无线传输模块采用 LoRa611AES,该模块具有较高的灵敏度和很好的抗干扰性能。为了使数据传输的更加安全可靠,模块对无线数据进行了加密处理。

2.1.5 电源模块

使用 12 V 的可充电锂电池进行供电。在信号调理电路当中,运放芯片的供电电压为 ±5 V,使用图 6a 所示的电源转换模块 MORN SUN 将 12 V 电压转为 ±5 V,而 STM32F103 主控芯片的供电电压为 3.3 V,将电源输出模块输出的 +5 V 再通过图 6b 所示的 LM1117-3.3 稳压芯片产生 3.3 V 电压,给 STM32F103 主控芯片供电。

2.2 软件设计

为了避免两路不同波长的 LED 之间相互干扰,通过定时器定时控制使 660 nm 和 850 nm 波长的两路 LED 分别间隔发光,在 LED 发光的同时对应的

NE5532 是一种高性能低噪声双运算放大器集成电路,具有相当高的小信号带宽及更好的噪声性能。图 5 为放大电路原理图。

放大电路的反向输入端连接 I/V 转换电路的输出端,在放大电路中可以通过调节滑动变阻器来调节 NE5532 第 1 级放大的放大倍数,使得放大倍数合理,第 1 级放大电路的输出电压计算式为

$$U_{1out} = -U_{in}R_5/R_6 \tag{5}$$

第 2 级放大电路的输出电压计算式为

$$U_{2out} = [R_{10}/(R_{11} + R_{14}) + 1][U_{1out}R_9/(R_8 + R_9)] \tag{6}$$

式中 U_{in} ——第 1 级放大电路输入电压

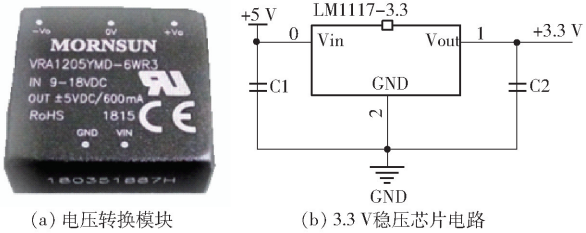


图 6 电源模块
Fig. 6 Power module

一路的光源接收模块进行光信号接收,两路 LED 的发光间隔为 500 ms。主控芯片收集到光源接收模块的输出电压后将数字量和电压分别显示到显示屏上,并经过无线传输模块传输到上位机。同时,装置包含模型嵌入接口功能,可以通过上位机输入不同的植被指数模型,构建多植被指数测量应用模式。软件流程图如图 7 所示。

上位机界面如图 8 所示,首先选择对应的端口和波特率,打开端口,与装置连接。装置计算的 660、850 nm 波长的反射率信息及实时数据的曲线图显示到上位机界面中。通过模型导入框,输入不同的植被指数模型,可以将植被指数嵌入到装置中,计算出不同的植被指数。

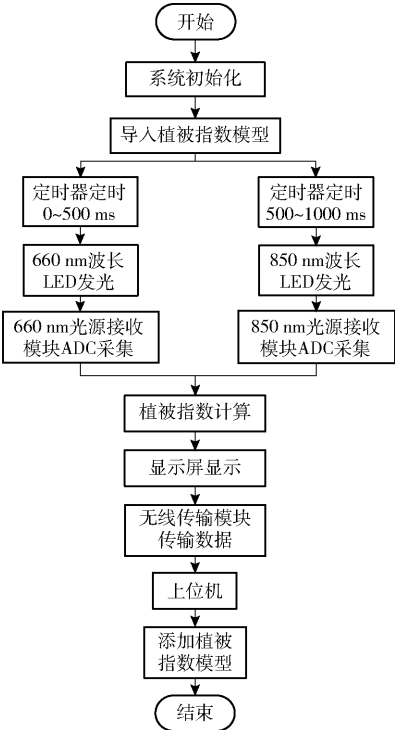


图7 软件流程图

Fig. 7 Flow chart of software

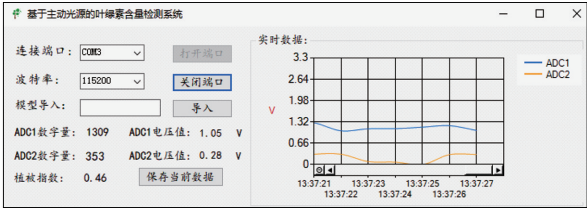


图8 上位机界面

Fig. 8 Upper computer interface

3 系统性能测试与分析

3.1 光源稳定性

光源的稳定性对作物叶片的反射光有很大的影响,因此,需要对光源的稳定性进行验证。试验于2018年5月在中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室进行,将该装置固定在反射率为99%的标准白板上方20 cm处,对660 nm和850 nm的光源进行1 h连续测量,660 nm和850 nm光信号的均方差分别为0.007 9、0.004 4,误差率分别为2.378%、1.223%。试验结果如表1和图9所示。

3.2 光源抗干扰性

除了光源稳定性外,为了测试主动光源在自然光环境中抵抗无关光信号干扰的能力,于2018年5月在中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室外进行试验。使用反射率为99%白板,装置距白板的高度为20 cm,天气为多云,测量时间为08:30—21:30,当太阳光照不足时,装置测

表1 光源的稳定性试验结果

Tab. 1 Stability of light source

参数	660 nm	850 nm
输出电压最大值/V	1.486	1.481
输出电压最小值/V	1.451	1.463
输出电压平均值/V	1.471	1.472
误差率/%	2.378	1.223
均方差	0.007 9	0.004 4

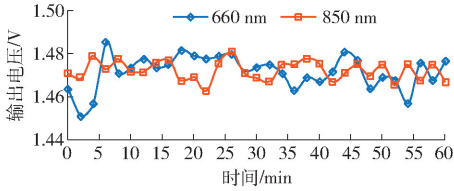


图9 光源稳定性测试结果曲线

Fig. 9 Curves of light source stability test result

量的是其自身光源的反射光信号。每30 min测量一次装置输出电压。试验结果统计如表2所示,数据动态如图10所示,660 nm和850 nm光信号的均方差分别为0.009 9、0.018 7,误差率分别为2.000%、4.360%,表明装置在自然光动态改变环境下能够较好消除自然光的影响。

表2 光源抗干扰性试验结果

Tab. 2 Anti-interference of light source

参数	660 nm	850 nm
输出电压最大值/V	1.512	1.466
输出电压最小值/V	1.481	1.395
输出电压平均值/V	1.500	1.376
误差率/%	2.000	4.360
均方差	0.009 9	0.018 7

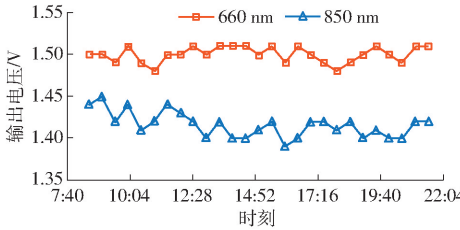


图10 光源抗干扰性测试结果曲线

Fig. 10 Curves of anti-interference of light source test result

3.3 反射率校正模型

采用4阶灰度板分别对装置660 nm和850 nm波长的接收数据进行反射率校正,校正模型 R^2 分别为0.993和0.979。校正模型为

$$R_{660} = 1.923\ 3x_{660} - 0.068\ 9 \quad (7)$$

$$R_{850} = 1.853\ 2x_{850} - 0.160\ 8 \quad (8)$$

式中 R_{660} 、 R_{850} ——660 nm和850 nm的反射率

x_{660} 、 x_{850} ——660 nm和850 nm的反射光信号

将660 nm和850 nm信号调理电路输出数据代

入式(7)、(8)中,计算两个波长的反射率,再分别计算 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 参数,相关计算式为

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \tag{9}$$

$$DVI = R_{nir} - R_{red} \tag{10}$$

$$RVI = \frac{R_{nir}}{R_{red}} \tag{11}$$

$$SAVI = \frac{(R_{nir} - R_{red})(1 + L)}{R_{red} + R_{nir} + L} \tag{12}$$

式中 R_{nir} 、 R_{red} ——850 nm 和 660 nm 波长的反射率
 L ——植被密度变化参数,通常取值 0.5

3.4 叶绿素梯度响应

为了验证装置与叶绿素含量之间的关系,对装置进行叶绿素梯度试验,试验于中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室进行。将叶绿素溶液分别按 100%、50%、25%、10% 进行配比稀释,形成 4 个叶绿素含量梯度,图 11 为四梯度叶绿素无纺布效果。

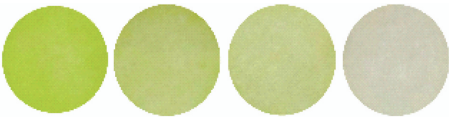


图 11 四梯度叶绿素
Fig. 11 Four-gradient chlorophyll

将配比好的溶液通过紫外分光光度计进行叶绿素含量的计算,无纺布浸泡后测量 660 nm 和 850 nm 波长反射率。

通过对 10 个样本的四梯度叶绿素测量,得到 660 nm 反射率与叶绿素含量呈负相关,相关系数为 -0.919,体现了叶绿素浓度越高,红色波段吸光增强导致的反射率越低的光谱特征;850 nm 作为参比波长,反射率与叶绿素含量之间相关系数为 0.272,说明二者相关性较差,间接体现了近红外光谱主要反映叶片结构与环境响应特征,对叶绿素浓度不敏感。说明测试 660 nm 和 850 nm 双波长作物反射率,利用 660 nm 作为叶绿素吸收特征,850 nm 作为基底参比特征,构建双波长植被指数可以用于叶绿素浓度的测量。以 NDVI 植被指数为例,与叶绿素梯度拟合 R^2 为 0.837。

SPAD 叶绿素仪是常规的叶绿素含量指标检测光谱学仪器,其 SPAD 值计算式为

$$SPAD = K \lg \frac{R_{ni}}{R_i} \tag{13}$$

式中 R_{ni} ——红外光波段的反射率
 R_i ——红光波段的反射率
 K ——常数

将 660 nm 和 850 nm 波长的反射率代入 SPAD

值计算公式,拟合叶绿素浓度得到 R^2 为 0.804。

对比 660 nm 和 850 nm 反射率 NDVI 值与 SPAD 值对叶绿素浓度梯度的响应关系,说明测量 660 nm 和 850 nm 波长的反射率,计算双波长植被指数或 SPAD 值都可以较好地反映叶绿素浓度的变化,其中 NDVI 拟合结果优于 SPAD 值。此外,通过加减运算的双波长植被指数计算相比 SPAD 计算更加简便,更加适于简化数据运算和处理。因而,本研究中优选双波长植被指数作为输出参数。

3.5 田间玉米作物叶绿素含量指标测试

试验于 2018 年 6 月在中国农业大学上庄实验站进行,天气多云,采集 30 株不同大小的玉米叶片,利用 SPAD 叶绿素仪对叶片进行测量,作为叶绿素含量指标。同时,在距离叶片 20 cm 处使用本文装置对 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 进行测量。它们与 SPAD 仪测量值之间的相关系数 r 分别为 0.892、0.846、0.867、0.883,建立一元线性回归模型,其 R^2 分别为 0.796、0.716、0.752、0.779。

为了提高装置的测量精度,以 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 为自变量,建立 SPAD 值的多元线性回归模型,其决定系数 R^2 为 0.831。该多元线性回归模型精度优于单一双波段植被指数所建立的一元线性回归模型,后续可利用软件系统中的模型导入功能进行嵌入,以便直接输出叶绿素含量指标值。

多元线性模型计算结果与 SPAD 值如图 12 所示,模型为

$$Y_s = 340.469x_{NDVI} + 31.595x_{DVI} - 6.234x_{RVI} - 233.922x_{SAVI} - 2.36 \tag{14}$$

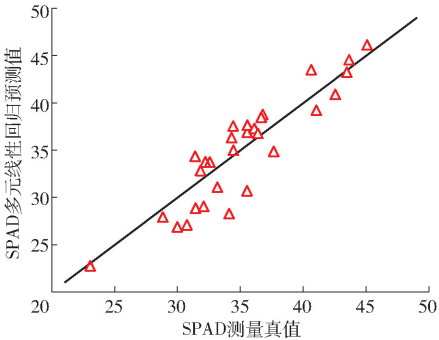


图 12 多元线性模型预测值与 SPAD 测量值
Fig. 12 Predictive value of multivariate linear model and SPAD measurement

4 结论

(1) 基于光谱分析技术,针对作物在红光波段产生深吸收、在近红外波段产生强反射的原理,采用主动光源方式,设计 660 nm 和 850 nm 的作物叶片双波长反射光信号采集装置,开发相应的硬件和软件系统,实现 NDVI、DVI、RVI、SAVI 指数的测量,并

提供了基于上述植被指数的诊断模型嵌入功能。

(2)开展了主动光源稳定性和抗干扰性试验,结果显示,660 nm 和 850 nm 光源的稳定性均方差为 0.007 9 和 0.004 4,误差率分别为 2.378% 和 1.223%。抗干扰性的均方差分别为 0.009 9 和 0.018 7,误差率分别为 2.000% 和 4.360%。

(3)利用灰度标准板拟合反射率校正模型,660 nm 波长和 850 nm 波长校正模型 R^2 分别为 0.993、0.979。利用叶绿素浸提液设置 4 梯度浓度测试试验,基于 660 nm 和 850 nm 双波长与叶绿素浓度的相关性分析,得出二者相关系数分别为 -0.919、0.272,符合作物叶片叶绿素引起的对应波长光谱特征机理分析结果。对比 NDVI 和 SPAD 公式计算结果,测定的 R^2 分别为 0.837、0.804,所以优选双波长植被指数为检测参数。

(4)田间测量玉米活体叶片的 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI,其与 SPAD 仪测量值的相关系数 r 分别为 0.892、0.846、0.867、0.883。将 NDVI、DVI、RVI 和 SAVI 与 SPAD 进行多元线性回归建模,其模型决定系数 R^2 为 0.831。

参 考 文 献

[1] 杨张青,胡建东,段铁城,等. 植株叶绿素无损诊断技术研究进展[J]. 中国农学通报,2019,35(7):139 - 144.
YANG Zhangqing, HU Jiandong, DUAN Tiecheng, et al. Advances in non-destructive diagnosis of plant chlorophyll [J]. China Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(7): 139 - 144. (in Chinese)

[2] 李哲,张飞,陈丽华,等. 光谱指数的植物叶片叶绿素含量估算模型[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(5):1533 - 1539.
LI Zhe, ZHANG Fei, CHEN Lihua, et al. Estimation model of chlorophyll content in plant leaves based on spectral index [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(5): 1533 - 1539. (in Chinese)

[3] 冯海宽,杨福芹,杨贵军,等. 基于特征光谱参数的苹果叶片叶绿素含量估算[J]. 农业工程学报,2018,34(6):182 - 188.
FENG Haikuan, YANG Fuqin, YANG Guijun, et al. Estimation of chlorophyll content in apple leaves based on characteristic spectral parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 182 - 188. (in Chinese)

[4] 肖汉,陈秀万,杨振宇,等. 基于光谱分析的草地叶绿素含量估测植被指数[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(11):3075 - 3078.
XIAO Han, CHEN Xiuwan, YANG Zhenyu, et al. Estimation of vegetation index based on chlorophyll content in grassland by spectral analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(11): 3075 - 3078. (in Chinese)

[5] 汤旭光,宋开山,刘殿伟,等. 基于可见/近红外反射光谱的大豆叶绿素含量估算方法比较[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(2):371 - 374.
TANG Xuguang, SONG Kaishan, LIU Dianwei, et al. Comparison of estimation methods of chlorophyll content in soybean based on visible/near infrared reflectance spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 371 - 374. (in Chinese)

[6] 卢少林,倪军,曹卫星,等. 基于主动光源的作物生长信息监测仪的设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(23):199 - 206.
LU Shaolin, NI Jun, CAO Weixing, et al. Design and test of crop growth information monitor based on active light source [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 199 - 206. (in Chinese)

[7] 丁永前,李杨,谭星祥,等. 冠层反射光谱测量中主动光源光谱稳定性控制[J]. 农业机械学报,2014,45(6):284 - 290.
DING Yongqian, LI Yang, TAN Xingxiang, et al. Spectral stability control of active light source in canopy reflectance spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 284 - 290. (in Chinese)

[8] 张猛,孙红,李民赞,等. 基于 4 波段作物光谱测量仪的小麦分蘖数预测[J]. 农业机械学报,2016,47(9):341 - 347.
ZHANG Meng, SUN Hong, LI Minzan, et al. Prediction of tillering number of wheat based on 4-band crop spectrometer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 341 - 347. (in Chinese)

[9] 倪军,姚霞,田永超,等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):150 - 156.
NI Jun, YAO Xia, TIAN Yongchao, et al. Design and experiment of portable crop growth monitoring and diagnosis instrument [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 150 - 156. (in Chinese)

[10] 张建国,朱永江,单娜娜,等. 基于 Greenseeker 冠层光传感器的棉花精准施氮技术规程[J]. 新疆农业科技,2018(4):27 - 29.
ZHANG Jianguo, ZHU Yongjiang, SHAN Nana, et al. Technical regulations for precise nitrogen application of cotton based on Greenseeker canopy light sensor [J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2018(4): 27 - 29. (in Chinese)

[11] ALI A M, THINDH S, SHARMA S, et al. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in northwestern India[J]. Field Crops Research, 2014, 161:11 - 15.

[12] SHEN J, MIAO Y, CAO Q, et al. Estimating rice nitrogen status using active canopy sensor crop circle 430 in Northeast China [C]//Third International Conference on Agro-geoinformatics. IEEE, 2014.

[13] CAO Q, MIAO Y, LI F, et al. Developing a new crop circle active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(1):2 - 18.

- [17] 侯云涛,蔡晓华,吴泽全,等. 奶牛行为特征识别方法的研究与实现——基于支持向量机[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 36–41.
HOU Yuntao, CAI Xiaohua, WU Zequan, et al. Research and implementation of cattle behavior character recognition method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 36–41. (in Chinese)
- [18] 强茂山,张东成,江汉臣. 基于加速度传感器的建筑工人施工行为识别方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(12): 1338–1344.
QIANG Maoshan, ZHANG Dongcheng, JIANG Hanchen. Recognizing construction worker activities based on accelerometers [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(12): 1338–1344. (in Chinese)
- [19] SMITH D, DUTTA R, HELLICAR A, et al. Bag of class posteriors, a new multivariate time series classifier applied to animal behaviour identification[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(7): 3774–3784.
- [20] 王俊,张海洋,赵凯旋,等. 基于最优二叉决策树分类模型的奶牛运动行为识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 202–210.
WANG Jun, ZHANG Haiyang, ZHAO Kaixuan, et al. Cow movement behavior classification based on optimal binary decision-tree classification model[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 202–210. (in Chinese)
- [21] 尹令,刘财兴,洪添胜,等. 基于无线传感器网络的奶牛行为特征监测系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 203–208.
YIN Ling, LIU Caixing, HONG Tiansheng, et al. Design of system for monitoring dairy cattle's behavioral features based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 203–208. (in Chinese)
- [22] SHAHRIAR M, SMITH D, RAHMAN A, et al. Detecting heat events in dairy cows using accelerometers and unsupervised learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 20–26.
- [23] 陈春玲,杨天娇,郭雷,等. 支持向量机在舍饲肉牛反刍行为分析中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6): 751–756.
CHEN Chunling, YANG Tianjiao, GUO Lei, et al. Application of support vector machine in analysis of ruminant behavior of beef cattle[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(6): 751–756. (in Chinese)
- [24] 尹令,洪添胜,刘迎湖,等. 基于无线传感器网络支持向量机奶牛行为特征识别[J]. 传感技术学报, 2011, 24(3): 458–462.
YIN Ling, HONG Tiansheng, LIU Yinghu, et al. Cow behavioral features recognition using binary decision tree support vector machines based on wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(3): 458–462. (in Chinese)

(上接第 181 页)

- [14] 谭文静,王永千,赵鹏飞. 基于反射光谱的植物群体叶绿素含量监测系统的研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 160–166.
TAN Wenjing, WANG Yongqian, ZHAO Pengfei, et al. Development of chlorophyll content monitoring system for plant population based on reflectance spectrum [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 160–166. (in Chinese)
- [15] 杨嘉,郭锐,黄蕾诺,等. 西北地区 MODIS-NDVI 指数饱和问题分析[J]. 高原气象, 2008(4): 896–903.
YANG Jia, GUO Ni, HUANG Leinu, et al. Analysis of the saturation problem of MODIS-NDVI index in Northwest China [J]. Plateau Meteorology, 2008(4): 896–903. (in Chinese)
- [16] 赵黎明,解保胜,那永光,等. 简述 SPAD-502 在水稻及其它作物上应用的研究进展[J]. 北方水稻, 2015, 45(1): 72–76, 80.
ZHAO Liming, JIE Baosheng, NA Yongguang, et al. The research progress of application of SPAD-502 in rice and other crops [J]. Northern Rice, 2015, 45(1): 72–76, 80. (in Chinese)
- [17] 纪荣婷,闵炬,黄程鹏,等. 光谱仪在作物施氮推荐中的应用研究进展——以 GreenSeeker 光谱仪为例[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 9–13.
JI Rongting, MIN Ju, HUANG Chengpeng, et al. Progress in the application of spectrometer in recommendation of nitrogen application to crops—take GreenSeeker spectrometer as an example[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2017, 45(2): 9–13. (in Chinese)
- [18] KIPPS, MISTELE B, SCHMIDHALTER U. The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100(1): 24–33.
- [19] 李民赞,韩东海,王秀. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [20] 马鑫,张东来,徐殿国. 光电二极管电参数模型及 I/V 转换稳定分析[J]. 哈尔滨工业大学报, 2009, 41(7): 89–92, 123.
MA Xin, ZHANG Donglai, XU Dianguo. Photodiode electrical parameter model and I/V conversion stability analysis [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2009, 41(7): 89–92, 123. (in Chinese)