

作物叶片叶绿素动态监测系统设计与试验

张智勇¹ 马旭颖² 龙耀威¹ 李松¹ 孙红¹ 李民赞^{1,2}

(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. 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)

摘要: 为了实现作物生长过程中叶绿素的动态在线监测,设计开发了一款叶绿素在线检测传感器系统。应用可见-近红外(660, 880 nm)波段光谱检测植物叶绿素含量的体积小、功耗低的模块,通过AD转换电路、数字滤波电路得到叶片反射光数字信号,利用灰度板对反射光信号进行反射率校准,660 nm和880 nm波段的反射率校正模型的 R^2 分别为0.999 6和0.999 5;取10个不同等级叶绿素溶液样本共80个,使用国标法检测叶绿素含量后将溶液倒入无纺布开展叶绿素梯度仿真测量。叶绿素检测模块测量双波长反射率后,分别计算归一化差值植被指数(NDVI)和叶绿素指标SPAD指数值。建立相应的叶绿素含量检测数学模型,其决定系数 R^2 分别为0.955 7、0.958 7。开展活体植株叶绿素检测验证试验,叶片原位光谱测量后,再将叶片剪碎,使用国标法测量叶绿素真实值,检测样本与真实值的相关系数分别为0.888 7、0.874 5。进而开展在线动态监测试验,实时监测水肥胁迫组和正常水肥管理对照组玉米幼苗植株,监测90 h内的叶绿素含量变化,可知,相同管理条件下植株叶绿素含量变化规律大致相同,受水肥胁迫的影响,水肥胁迫组的叶绿素浓度呈下降趋势。证明了传感器系统在线监测作物叶绿素动态的可行性,可为农作物生长与胁迫动态监测提供技术支持。

关键词: 叶绿素含量; 动态监测; 光谱分析; 物联网

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0115-07

Design and Development of Crop Chlorophyll Dynamic Monitoring System Based on Internet of Things

ZHANG Zhiyong¹ MA Xuying² LONG Yaowei¹ LI Song¹ SUN Hong¹ LI Minzan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, 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)

Abstract: In order to implement the agricultural IoT systems of chlorophyll dynamic monitoring the function, a visible-near infrared (660 nm, 880 nm) band spectral module was designed with the characteristics of small volume and low power consumption for the chlorophyll content detection in plants. Through AD conversion circuit, digital filter circuit was designed to get the blade reflected light digital signal. The reflectivity of reflected light signal was calibrated by gray scale plate, the R^2 of the reflectivity correction model at 660 nm and 880 nm were 0.999 6 and 0.999 5, respectively. A total of 80 samples of 10 different grades were taken, and the chlorophyll content was detected by national standard method. The solution was poured into non-woven cloth and measured by chlorophyll detection module. The normalized vegetation index (NDVI) value and soil and plant analyzer development (SPAD) value were obtained by the calculation of dual bands spectral reflectance, and the corresponding mathematical model was established to monitor the chlorophyll content. As a result, the determination coefficient R^2 was 0.955 7 and 0.958 7, respectively. An experiment was conducted to establish the chlorophyll content monitoring model. After the spectrum signal measurement by chlorophyll detection module in the living

收稿日期: 2019-04-25 修回日期: 2019-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300505-1)、国家自然科学基金项目(31501219)、中国农业大学研究生实践教学基地建设
项目(ZYXW037)和中国农业大学研究生课程建设项目(HJ2019029、YW2019018)

作者简介: 张智勇(1995—),男,硕士生,主要从事电子通信与技术研究,E-mail: 18601003021@163.com

通信作者: 孙红(1980—),女,副教授,博士,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: sunhong@cau.edu.cn

plants nondestructively, the leaves were sampled and measured to get the true value of chlorophyll with the national standard method. According to NDVI and SPAD parameter, the correlation coefficient between the detection value and the true value was 0.888 7 and 0.874 5. Furthermore, an online dynamic monitoring experiment was conducted to monitor maize seedlings in the water-fertilizer stress group and the normal water-fertilizer management control group in real time. The chlorophyll changes in the plants were detected within 90 h. Under the same management conditions, the chlorophyll change rules of plants were roughly the same. Under the influence of water and fertilizer stress, the chlorophyll concentration in the water and fertilizer stress group showed a downward trend. It was showed that the sensor system was feasible to monitor the chlorophyll dynamics of crops online and can provide support for crop information acquisition.

Key words: chlorophyll content; dynamic monitoring; spectral analysis; internet of things

0 引言

物联网技术在农业领域的应用形成了以传感设备为基础的农业物联网系统,用于感知农业环境、土壤和作物对象信息,为现代化农业管理决策提供支撑^[1]。

通常农业物联网接入空气温度、湿度、光照以及土壤温度、土壤水分和电导率等传感器,监测环境和土壤动态,指示作物生产环境胁迫状态,以指导作物水肥管理^[2]。然而,目前农业物联网对作物生长状态的检测主要以监控视频图像、分析外观为辅助依据,尚未形成直接指示作物营养发育情况的传感器^[3]。

由于作物叶绿素对光吸收的特性,以及在植物光合与营养状况中的重要指示作用,学者们开展了基于光谱分析的作物营养诊断机理研究^[4-5],毛智慧等^[6]利用不同多光谱传感器及植被指数预测 SPAD 精度,结果表明,在 550、660、735 nm 的反射率对 SPAD 值的变化较敏感,决定性系数 R^2 分别为 0.802 9、0.778 6、0.724 8;孙洁琼等^[7]对不同波段间的比值指数和归一化指数与冬小麦叶绿素含量之间的相关性进行研究,发现 870、660 nm 双波段及 660、460 nm 双波段叶绿素含量的相关性最高,检测模型 R^2 分别达到 0.46 和 0.465 7。上述研究均表明,采用可见-近红外光谱技术具有对植物叶绿素进行快速测定的理论基础与应用的优势。同时,基础研究也指出,660 nm 附近的红光与 700~900 nm 区间近红外是叶绿素含量检测的特征波段^[8-9]。

基于理论研究的成果,国内外研究者开展了作物叶绿素光谱学诊断传感器的设计和开发^[10-13]。如 SPAD(Soil plant analysis development)叶绿素计,利用 650 nm 和 940 nm 处透射光的相对比值计算叶绿素含量指标^[14-16]。基于植物在近红外和红光范围的反射光谱构建的归一化植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)用于检测植被生长

状态,形成了 Greenseeker 便携式光谱仪(660 nm 和 780 nm)、Crop Circle ACS-210 冠层反射光谱传感器(650 nm 和 880 nm)、Yara N-Sensor 氮素测量仪(650 nm 和 840 nm)等作物生长诊断系统,并进行了田间应用^[17-19]。

然而上述研究中,各类手持设备均可对叶片光谱信息进行采集和分析,完成叶绿素的测量,但无法对植物叶片叶绿素进行长时间监测,实时了解植物的生长状况。因而,引入物联网技术,设计一款叶绿素在线检测传感器系统,为作物生长过程中叶绿素动态变化提供监测手段,具有重要的价值^[20-24]。

本文设计一种基于光谱学的叶绿素指标实时监测模块,通过可见红光和近红外双波长交替发光照射植物叶片,采集反射光光强,通过 AD 转换、数字滤波、反射率校正标定,计算光谱学参数,检测叶绿素含量指标。并进行传感器的相关测试,对其在植物生长胁迫动态中的应用进行可行性分析。

1 系统原理与工作流程

1.1 系统原理

基于光谱的作物生理信息检测的原理是,作物生理信息的变化会影响作物叶片颜色、厚度及形态结构等方面的变化,从而导致光谱吸收、反射和投射特性的变化。具体来说,叶绿素光谱吸收规律为:吸收峰位于蓝光和红光光谱区域,吸收谷位于绿光光谱区域,在近红外光谱区域几乎不被吸收。基于相关文献总结,选取 660、880 nm 波段光谱,用于叶绿素含量动态光谱学监测。

设计分别发射 660 nm 和 880 nm 波长的 LED,依据植物叶片叶绿素对红光光谱区域的强吸收特性和对近红外光谱区域的强反射特性,可知两个波长的光照射叶片后,被吸收的光能量与叶绿素含量具有相关性,叶绿素含量越多,红光被吸收能量多,反射的光能量越小;近红外几乎不被叶绿素吸收,照射叶片后所损失的能量多是叶片其他成分及光路传输

损失,可作为参照量;由此,设计模块可对叶片发射两种不同波长(660、880 nm)的光,光感应器件接收反射光并经电路处理得到数字信号,经过实验建立叶绿素检测模型,可实现模块对作物叶绿素的实时监测。

1.2 硬件电路设计

设计作物叶绿素动态监测系统,包括核心控制模块、叶绿素监测模块、存储模块和无线传输模块。系统总体框图如图 1 所示。

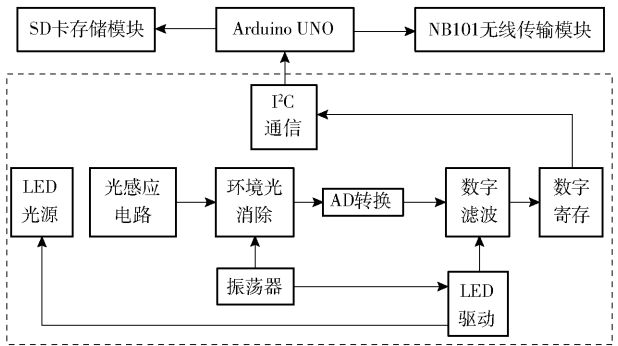


图 1 系统总体框图
Fig. 1 System structure diagram

叶片叶绿素含量检测模块集成度高、体积小,可将叶绿素检测模块贴合在植物叶片上,实现植物叶片叶绿素的实时监测,并制作了模块外壳装置,以便于模块稳定贴合于植物叶片,装置与测量场景图如图 2 所示。

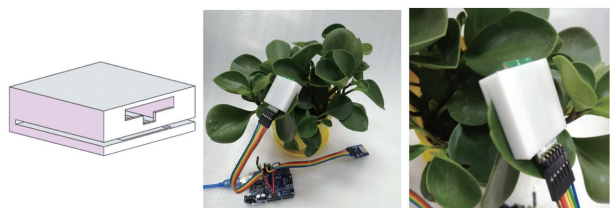


图 2 模块外壳装置与测量场景图

Fig. 2 Module shell device and measurement scene diagram

(1)核心控制模块 Arduino UNO

Arduino UNO 是基于 ATmega328P 的 Arduino 开发板。它有 14 个数字输入/输出引脚(其中 6 个可用于 PWM 输出)、6 个模拟输入引脚、16 MHz 的晶体振荡器、USB 接口、DC 接口、ICSP 接口、复位按钮。包含了微控制所需要的硬件设备,只需将它连接到计算机的 USB 接口、AC-DC 适配器,或者使用电池,就可以驱动工作。

(2)叶绿素监测模块

叶绿素监测模块使用 MAX30102 芯片作为收发光器件,主要集成了光源及驱动电路、光感应和 AD 转换电路、环境光干扰消除及数字滤波电路,只将数字接口留出,使用单片机通过硬件 I²C 或者模拟 I²C 接口来读取信号,就可以得到转换后的光强度数值,

通过编写相应的算法得到植物叶片叶绿素含量检测值。

电源电路部分线性稳压器选择低压差线性稳压器(LDO)AMS1117-1.8,传统的线性稳压器如 78XX 系列的芯片都要求输入电压比输出电压至少高出 2~3 V,否则无法正常工作,而 MAX30102 芯片上 LED 供电推荐 3.3 V,所以两者都需要一个转 1.8 V 的 LDO。电路设计如图 3 所示。

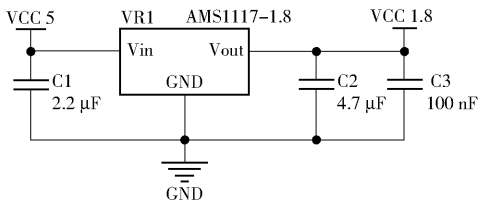


图 3 电源电路
Fig. 3 Power circuit

为保证叶绿素监测模块的通用性,设计电平转换电路以适用于通信电平非 1.8 V 的单片机,用 MOS 管设计一个双向电平转换电路,工作原理如图 4(HV 为高电压端,LV 为低电压端)。

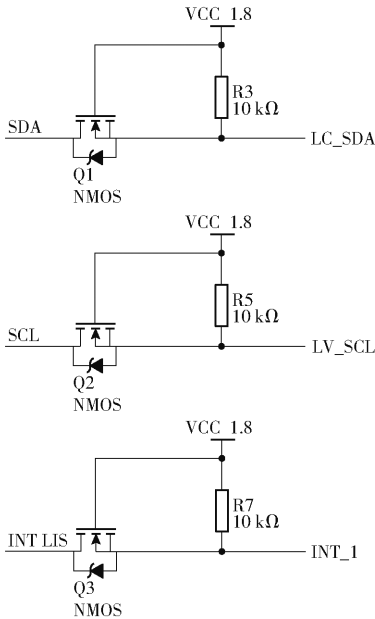


图 4 电平转换电路
Fig. 4 Level conversion circuit

当信号从外部进来,HV 端为高,MOS 管截止,所以芯片 LV 端也为高。当信号从外部进来,HV 端为低,MOS 管内部二极管导通,从而使 MOS 管导通,所以芯片端也为低。当信号从内部出去,芯片 LV 端为高,MOS 管截止,所以芯片端也为高。当信号从内部出去,芯片 LV 端为低,MOS 管导通,所以芯片端也为低。

(3)SD 卡存储模块

Micro SD 卡存储模块支持 Micro SD 卡、Micro SDHC 卡(高速卡);板载电平转换电路,即接口电平

可为 5 V 或 3.3 V, 供电电源为 4.5 ~ 5.5 V, 板载 3.3 V 稳压电路; 通信接口为标准 SPI 接口, 通过文件系统及 SPI 接口驱动程序, 单片机系统即可完成 Micro SD 卡内的文件进行读写; Arduino 可直接使用 Arduino IDE 自带的 SD 卡程序库即可完成卡的初始化和读写。

(4) 无线传输模块 NB101

无线传输采用 NB101 模块(图 5), 它是谷雨物联网推出的 NB-IOT 产品, 基于移远 BC95 设计的小系统板。包含天线射频、电源、SIM 卡座、ESD 防护等电路, 连接电源、串口即可使用。可将串口接收的数据信息通过 SIM 卡流量上传到专属云透传平台, 便于远程监测数据。

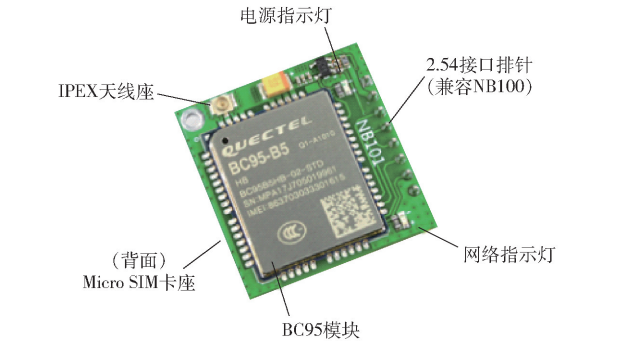


图 5 NB101 实物图

Fig. 5 NB101 physical drawing

1.3 软件设计

软件流程如图 6 所示, 使用时测量作物叶绿素含量的基本工作流程包括: 光谱反射率标定、参数初始化、反射光强测量、叶绿素含量本地计算、数据存储与传输 5 部分。

(1) 光谱反射率标定: 由于模块电源电压、光源、电路等硬件本身存在的差异性, 使用反射率已知的灰度板或白板对模块采集光强度与所测物体反射率之间建立对应关系。

(2) 参数初始化: 首先将叶绿素检测模块与开发板的 COM 端口连接, 波特率可根据实际要求设置, 无奇偶校验位。上电后, 单片机复位叶绿素检测模块并对模块进行功能初始化, 此时 660 nm 红光和 880 nm 近红外 LED 交替点亮来检测叶片中叶绿素反射的光强, 此时可以看到模块有红光亮起, 初始化完成。

(3) 反射光强测量: 单片机将一段时间内叶绿素检测模块采集的两个 LED 反射数据存储在内部 RAM 中, 然后分别计算 660 nm 红光和 880 nm 近红外 LED 的直流信号(DC)和交流信号(AC), 去除交流信号环境光噪声的影响, 得到照射物体后反射光的光强。

(4) 叶绿素含量本地计算: 根据计算公式得到

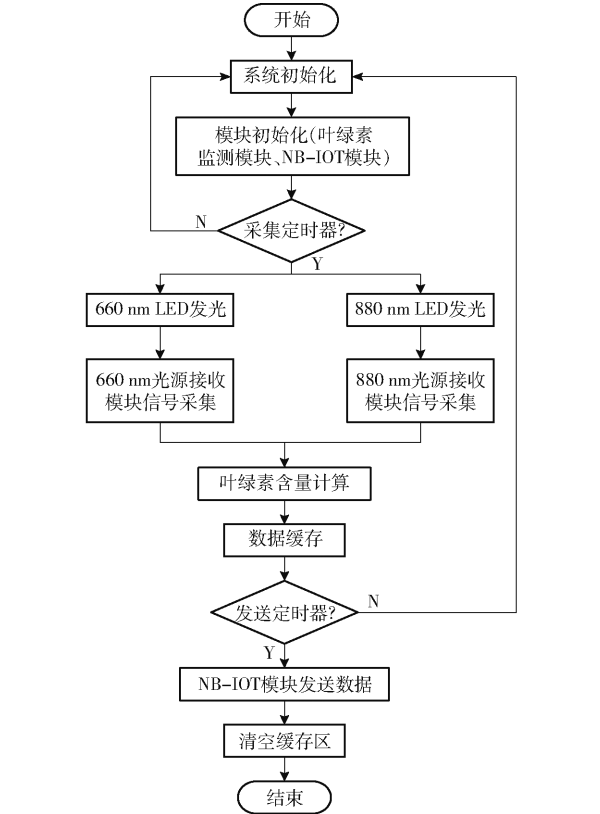


图 6 软件流程图

Fig. 6 Software flow chart

植物双波长检测参数, 建立作物叶绿素含量指标检测数学模型, 计算叶绿素含量测量值。

(5) SD 卡存储和无线数据传输: 叶绿素监测模块采集数据经过单片机计算后, 将原始数据与计算后叶绿素含量值存入本地 SD 存储卡并通过 NB-IOT 模块进行数据无线传输, 通过 SIM 卡将数据上传至云透传平台, 可实现数据的远程查看和监测。

2 光源稳定性测试与反射率标定

2.1 光源稳定性测试

为实现物联网系统对植物叶绿素长时间的无损监测, 叶绿素监测模块需要长时间贴合于植物叶片表面进行测量, 此时, 光源的稳定性至关重要。因此, 为验证模块光源的稳定性, 使 660 nm 和 880 nm 的 LED 光源进行 24 h 的发光, 并对光信号进行 24 h 实时监测。试验结果如表 1 所示。

表 1 光源的稳定性试验结果

Tab. 1 Experiment result of stability of light source		
参数	660 nm 光强/cd	880 nm 光强/cd
最大值	120 630	169 441
最小值	120 197	168 440
平均值	120 426. 8	168 994
误差率/%	0. 003 596	0. 005 923

24 h 内, 每 5 min 进行一次数据采集, 共得到

288 个数据样本,样本误差率为 0.003 596%、0.005 923%,模块光源的稳定性得以验证,达到物联网系统对终端传感器的要求,可以作为叶绿素监测模块长时间采集叶片叶绿素数据。

2.2 反射率标定试验

采用 4 阶灰度板分别对仪器 660 nm 和 880 nm 波段的接收数据进行反射率校正,4 阶灰度板如图 7 所示。叶绿素监测模块对 4 阶灰度板进行照射并对 660 nm 和 880 nm 光强度采集,3 次采集取平均值,数据统计结果如表 2 所示。



图 7 4 阶灰度板

Fig. 7 4-order gray board

表 2 反射率标定试验结果

Tab. 2 Results of reflectivity calibration			cd
反射率	660 nm 光强	850 nm 光强	
0.10	12 877.2	16 507.0	
0.25	27 400.0	33 858.0	
0.50	56 327.6	68 529.8	
0.99	110 152.6	135 488.6	

模块测得光强与 4 阶灰度板反射率校正模型 R^2 分别为 0.999 6 和 0.999 5。校正模型为

$$R_{660} = 9 \times 10^{-6} L_{660} - 0.009\ 1 \tag{1}$$

$$R_{880} = 7 \times 10^{-6} L_{880} - 0.011\ 5 \tag{2}$$

式中 R_{660} 、 R_{880} ——660 nm 和 880 nm 波段的反射率
 L_{660} 、 L_{880} ——660 nm 和 880 nm 波段的反射光强

试验结果表明,该模块对物体反射率有极好的测试能力,可以通过试验公式准确测得物体反射率。将 660 nm 和 880 nm 信号调理电路输出的数据代入模型中,计算出两个波段的反射率,NDVI 指数和 SPAD 指数计算式为

$$NDVI = \frac{I_t - R_t}{I_t + R_t} \tag{3}$$

$$SPAD = K \lg \frac{I_t}{\frac{I_0}{R_t}} \tag{4}$$

式中 K ——常数

I_t ——接收到的透过叶片反射 940 nm 红外光强度

I_0 ——发射的红外光强度
 R_t ——接收到的透过叶片经叶片反射 650 nm 红光强度
 R_0 ——发射的红光强度

2.3 叶绿素建模试验

为了得到不同叶绿素含量分布,取玉米叶片样本,剪碎叶片,倒入丙酮与乙醇体积比为 2:1 的混合溶液萃取叶绿素,每个样本经稀释分为 10 等级,共得到 80 个不同叶绿素等级的样本。

(1)使用紫光-可见光分光光度计测量 645 nm 和 663 nm 波段吸光度 A_{645} 、 A_{663} ,计算其叶绿素含量

$$C_t = 8.05 A_{663} + 20.29 A_{645} \tag{5}$$

式中 C_t ——叶绿素含量计算值

试验样本溶液与设备如图 8 所示。



图 8 萃取叶绿素溶液与设备

Fig. 8 Chlorophyll extraction solution and equipment

(2)将萃取溶液倒在无纺布上晾干,部分无纺布样本如图 9 所示,使用叶绿素检测模块测量无纺布上叶绿素含量 C_t ,根据反射率标定试验计算公式测得 660、880 nm 在无纺布上的反射率,根据公式(3)、(4)分别计算其 NDVI 指数和 SPAD 指数。

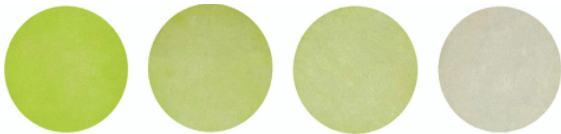


图 9 部分无纺布样本

Fig. 9 Samples of fabric with chlorophyll

(3)叶绿素含量 C_t 分别与 NDVI 指数计算值和 SPAD 指数计算值进行线性拟合,试验结果如图 10、11。

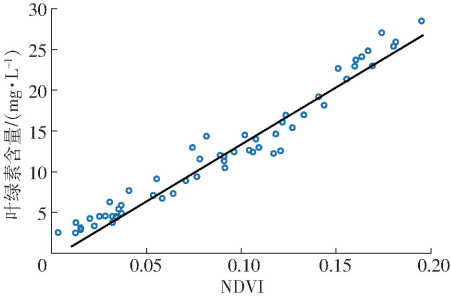


图 10 叶绿素含量与 NDVI 线性拟合结果

Fig. 10 Linear fitting of chlorophyll and NDVI value

线性拟合方程为

$$C_{T1} = 134.27 NDVI + 0.389\ 8 \tag{6}$$

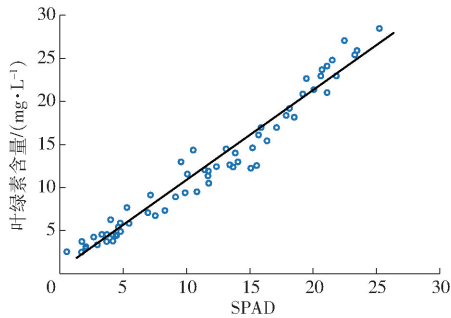


图 11 叶绿素含量真实值与 SPAD 测量值线性拟合结果

Fig. 11 Linear fitting of true value of chlorophyll and measured value of SPAD

$$C_{T2} = 1.0431SPAD + 0.2835 \quad (7)$$

式中 C_{T1} ——由 NDVI 指数值预测的叶绿素含量

C_{T2} ——由 SPAD 指数值预测的叶绿素含量

结果表明,叶绿素监测模块所测数据计算所得 NDVI 值、SPAD 值分别与紫光-可见光分光光度计所测叶绿素含量决定系数 R^2 为 0.955 7、0.958 7,由此可见,所测 NDVI、SPAD 与叶绿素含量真实值都存在高度线性相关关系,相比来说,SPAD 计算值建模精度略高。

3 试验

3.1 作物叶绿素含量无损检测

在实验室环境下,以 30 片不同生长状态的玉米幼苗样本为试验对象,在不摘离植株的前提下,将活体植物叶片平铺,将叶绿素检测模块压于叶片上,使用叶绿素监测模块测量叶片的反射光强,由光强值计算叶片的 NDVI 指数、SPAD 指数值,多次测量同一叶片不同位置叶绿素含量,取平均值,将 NDVI 指数、SPAD 指数值分别代入线性拟合公式(6)、(7),得到该叶片叶绿素预测值;然后将所测叶片剪碎,由紫外-分光光度计测得叶片样本叶绿素真实值,数据关系如图 12、13 所示。

试验结果表明,预测值 C_{T1} 、 C_{T2} 与叶绿素真实值相关系数分别为 0.888 7、0.874 5,通过计算 NDVI 指数、SPAD 指数值,可以较为准确地预测植物叶绿素含量。对于参数的最优选择后续还需要进行大量的试验验证。

3.2 植物胁迫动态监测

本试验是对植物进行环境控制,监测长时间内植物生理信息的动态变化,看植物信息变化范围是否满足项目需要,即动态监测精度问题。

在实验室环境下,以 4 株玉米幼苗为试验对象,为监测到植物叶绿素有明显变化,将 1、2 号两株植物叶片移植在沙土培养,沙土内无水无肥,无法为植物提供任何养料,使 1、2 号植株自然枯萎;3、4 号两

株植物在正常施肥施水的土壤里培育,使其自然生长,使用 4 块叶绿素监测模块分别贴于 4 株玉米叶片表面,同时监测 4 株植物叶片的叶绿素变化,在 90 h 内 4 片叶片叶绿素含量变化动态曲线如图 14 所示。

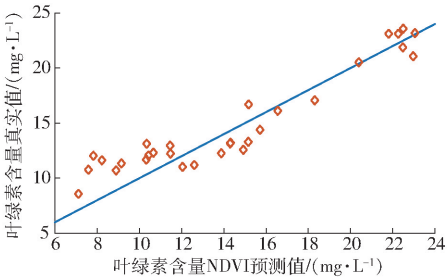


图 12 叶绿素含量真实值与 NDVI 预测值相关性

Fig. 12 True value of chlorophyll correlated with predicted value of NDVI

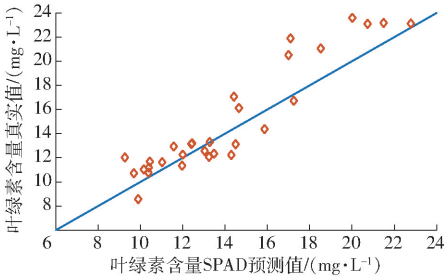


图 13 叶绿素含量真实值与 SPAD 预测值相关性

Fig. 13 True value of chlorophyll correlated with predicted value of SPAD

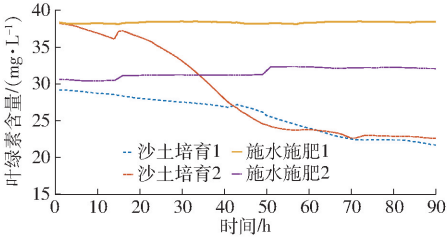


图 14 4 株植物 90 h 内叶绿素含量动态监测结果

Fig. 14 Dynamic monitoring of chlorophyll content in four plants within 90 h

试验证明,叶片植物生理信息会随环境的变化而改变,3 号和 4 号同类叶片在相同环境下叶绿素的变化规律基本一致,1 号和 2 号水分胁迫进程中叶绿素相应发生动态胁迫反映,呈现下降趋势,说明本系统满足实时监测植物生长与胁迫状态的需求。目前本试验针对作物叶片叶绿素动态监测做了初步研究,后续会深入开展在多环境变量条件下作物叶绿素动态变化的相关试验。

4 结论

(1) 通过 24 h 不间断测试模块的光源(660、880 nm)稳定性,试验得出模块光源误差率分别为 0.003 596% 和 0.005 923%,满足在线监测作物叶绿

素的要求。

(2)为建立叶绿素浓度检测模型,采用叶绿素萃取稀释样本,基于紫外-可见光分光光度计测得溶液叶绿素含量后,建立梯度样本,NDVI 指数、SPAD 指数值与叶绿素真实值建模决定系数 R^2 分别达到 0.955 7、0.958 7,验证了所设计模块对叶绿素检测的可行性。

(3)使用叶绿素检测模块贴于 30 片玉米叶片

上,无损测得叶片 NDVI 指数、SPAD 指数值,预测叶绿素值与叶绿素真实值相关系数分别为 0.888 7、0.874 5,表明本设计可以作为无损检测植物叶片叶绿素含量的检测设备。

(4)针对作物生长环境进行控制,测得 4 株植物在不同环境下叶绿素含量存在不同变化,在相同环境下叶绿素含量变化规律基本一致,表明本设计可以实时监测植物叶绿素的动态变化。

参 考 文 献

[1] 李道亮,杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(1):1-20.
LI Daoliang, YANG Hao. Research progress and development trend analysis of agricultural IoT technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):1-20. (in Chinese)

[2] 何勇,聂鹏程,刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(10):216-226.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Research progress of agricultural Internet of things and sensing instruments [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):216-226. (in Chinese)

[3] KAMILARIS A, PITSILLIDES A. Mobile phone computing and the Internet of things: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6):885-898.

[4] 毛博慧,李民赞,孙红,等. 冬小麦苗期叶绿素含量检测光谱学参数寻优[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊1):164-169.
MAO Bohui, LI Minzan, SUN Hong, et al. Optimization of spectroscopy parameters and prediction of chlorophyll content at seeding stage of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1):164-169. (in Chinese)

[5] ZAMZAM N, KAUCIKAS M, NÜRNBERG D J, et al. Femtosecond infrared spectroscopy of chlorophyll f-containing photosystem I[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2019, 21(3):117-131.

[6] 毛智慧,邓磊,孙杰,等. 无人机多光谱遥感在玉米冠层叶绿素预测中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(9):2923-2931.
MAO Zhihui, DENG Lei, SUN Jie, et al. Application of UAV multi-spectral remote sensing in chlorophyll prediction of maize canopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9):2923-2931. (in Chinese)

[7] 孙洁琼,孙明,姜伟杰. 基于光谱分析的冬小麦叶绿素含量检测研究[C]//纪念中国农业工程学会成立三十周年暨中国农业工程学会学术年会,2009.
SUN Jieqiong, SUN Ming, JIANG Weijie. Study on the detection of chlorophyll content in winter wheat based on spectral analysis [C]//Commemorate the 30th Anniversary of the Establishment of the Chinese Society of Agricultural Engineering and the Academic Annual Meeting of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009. (in Chinese)

[8] SHANMUGAM P, HE X, SINGH R K, et al. A modern robust approach to remotely estimate chlorophyll in coastal and inland zones[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(10):2491-2509.

[9] SUN Y, WANG X F, CHEN G, et al. Near-infrared absorption carboxylated chlorophyll- a derivatives for biocompatible dye-sensitized hydrogen evolution[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(24):15731-15738.

[10] 邹兵,侯加林,李民赞. 基于光谱学和 ARM 的番茄叶绿素检测仪的开发[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊2):223-227.
ZOU Bing, HOU Jialin, LI Minzan. Development of tomato chlorophyll content detector based on spectroscopy and ARM[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2):223-227. (in Chinese)

[11] 丁永军,李民赞,安登奎,等. 基于光谱特征参数的温室番茄叶片叶绿素含量预测[J]. 农业工程学报,2011,27(5):244-247.
DING Yongjun, LI Minzan, AN Dengkui, et al. Prediction of chlorophyll content using spectral response characteristics of greenhouse tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):244-247. (in Chinese)

[12] DUNN B L, SINGH H, PAYTON M, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium on SPAD-502 and at LEAF sensor readings of Salvia[J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41(13):1-10.

[13] NETO A J S, LOPES D C, PINTO F A C, et al. Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for non-destructive estimation of water and chlorophyll status in sunflower leaves[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155(6):124-133.

[14] 付彦博,王治国,耿庆龙,等. 基于光谱分析不同温度下棉花叶片 SPAD 值含量估测[J]. 新疆农业科学,2017,54(3):23-30.
FU Yanbo, WANG Zhiguo, GENG Qinglong, et al. Estimation of SPAD content in cotton leaves at different temperatures based on spectral analysis [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(3):23-30. (in Chinese)

[15] COSTE S, BARALOTO C, LEROY C, et al. Assessing foliar chlorophyll contents with the SPAD-502 chlorophyll meter: a calibration test with thirteen tree species of tropical rainforest in French Guiana[J]. Annals of Forest Science, 2010, 67(6):607-607.

[16] NAUS J, PROKOPOVA J, REBICEK J, et al. SPAD chlorophyll meter reading can be pronouncedly affected by chloroplast movement[J]. Photosynthesis Research, 2010, 105(3):265-271.

Nashville:Vanderbilt University Press, 1999.

- [13] DO M N. The contourlet transform; an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 14(12):2091–2106.
- [14] 李伟,杨晓慧,石光明,等. 基于几何多尺度方向窗的小波图像去噪[J]. 西安电子科技大学学报,2006,23(5):682–686.
LI Wei, YANG Xiaohui, SHI Guangming, et al. Image denoising method using wavelet based on the multiscale geometrical directional windows[J]. Journal of Xidian University, 2006, 23(5):682–686. (in Chinese)
- [15] HUANG Yong. Research on the approximation characteristics of Bandelet transform[C]//Proceedings of 2017 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer(MACMC 2017), 2017.
- [16] 李彦,汪胜前,邓承志. 多尺度几何分析的图像去噪方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(34):168–173.
LI Yan, WANG Shengqian, DENG Chengzhi. Overview on image denoising based on multi-scale geometric analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(34):168–173. (in Chinese)
- [17] PENNEC E L, STEPHANE M. Sparse geometric image representations with Bandelets[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(4):423–438.
- [18] SIDHIK S. Comparative study of Birge–Massart strategy and unimodal thresholding for image compression using wavelet transform[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(24):5952–5955.
- [19] DONOHO D L. Wedgelets; nearly minimax estimation of edges[J]. The Annals of Statistics, 1999, 27(3):859–897.
- [20] GAO H, BRUCE A G, INC M. Waveshrink with firm shrinkage[J]. Statistica Sinica, 1997, 7(4):855–874.
- [21] DONOHO D L, JOHONSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Publications of the American Statistical Association, 1995, 90(432):1200–1224.
- [22] CHANG S G, YU B, VETTERLI M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9):1532–1546.

(上接第121页)

- [17] 薛利红,覃夏,李刚华,等. 江西鹰潭早稻关键生育期的 NDVI 诊断指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2):223–227.
XUE Lihong, QIN Xia, LI Ganghua, et al. Diagnostic indexes of NDVI at key growth stages for early rice at Yingtan, Jiangxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2):223–227. (in Chinese)
- [18] 刘豪杰,李民赞,孙红,等. 基于车载式冠层光谱传感器的玉米拔节期叶绿素含量诊断[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2):169–173.
LIU Haojie, LI Minzan, SUN Hong, et al. Estimation of maize chlorophyll content by vehicle-mounted crop canopy sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2):169–173. (in Chinese)
- [19] MAYFIELD A H, TREGOE S P. Grain yield and protein responses in wheat using the N-sensor for variable rate N application [J]. Crop & Pasture Science, 2009, 60(9):818–823.
- [20] 董淑娟. 水稻生长信息动态监控系统设计-基于物联网技术[J]. 农机化研究, 2017, 39(8):216–219.
DONG Shujuan. Design of rice growth information dynamic monitoring system based on Internet of things technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8):216–219. (in Chinese)
- [21] 丁永军,张晶晶,孙红,等. 玻璃温室环境下番茄叶绿素含量敏感光谱波段提取及估测模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1):194–199.
DING Yongjun, ZHANG Jingjing, SUN Hong, et al. Extraction and estimation model of sensitive spectral band of chlorophyll content in tomato under glass greenhouse environment [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(1):194–199. (in Chinese)
- [22] 刘芬,屈成,肖楠,等. 水稻高光谱变化特征与叶绿素含量监测研究[J]. 激光生物学报, 2017, 26(4):326–333.
LIU Fen, QU Cheng, XIAO Nan, et al. Characteristics of hyperspectral changes and chlorophyll content monitoring in rice [J]. Chinese Journal of Laser Biology, 2017, 26(4):326–333. (in Chinese)
- [23] ZHANG Y, HALLIKAINEN M, ZHANG H, et al. Chlorophyll-a estimation in turbid waters using combined SAR data with hyperspectral reflectance data; a case study in lake Taihu, China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2018, 57(9):1–12.
- [24] 王爱芳,王妮,高明,等. 基于高光谱的香樟叶绿素含量估测模型研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2018, 32(1):14–19.
WANG Aifang, WANG Ni, GAO Ming, et al. Study on the estimation model of chlorophyll content in *Camphoracampophora* based on hyperspectral method [J]. Journal of Heilongjiang University of Engineering, 2018, 32(1):14–19. (in Chinese)