

小麦冠层营养诊断光谱检测仪设计与试验^{*}

赵毅 文瑶 孙红 李民赞 张猛 吴李烜
(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)

摘要: 为了快速准确获取田间作物生长营养水平信息,设计了作物冠层营养诊断光谱检测仪,并进行了小麦大田测试。系统由光学传感器,信号采集驱动模块和控制器组成。光学传感器可测量 300 ~ 1 100 nm 范围内连续光谱,信号采集驱动模块用于提供稳定电压以及数据的 A/D 转换。开发了光谱采集控制软件安装于控制器,主要功能包括接收、处理、显示和存储采集到的数据。应用该仪器进行了标定试验,并针对大田冬小麦开展了大田试验,试验结果表明该仪器所测反射率与美国 ASD FieldSpec HandHeld 2 光谱辐射仪所测的反射率之间具有较高的相关性,相关系数最低为 0.991 8。分析了冬小麦叶绿素含量指标 SPAD 值与仪器所测反射率之间的相关性。选出相关性较高的 550 ~ 900 nm 波段进行主成分分析建立叶绿素预测模型,建模 R_c^2 为 0.575,模型检验 R_v^2 为 0.595。结果表明利用研发的便携式光谱检测仪能有效评估小麦营养叶绿素含量,为小麦的精细栽培提供理论与技术支持。

关键词: 作物检测 精细农业 归一化差值植被指数 光谱分析

中图分类号: S237; TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0222-06

Design and Test of Nutrition Diagnosis System for Wheat Canopy Based on Spectroscopy

Zhao Yi Wen Yao Sun Hong Li Minzan Zhang Meng Wu Lixuan
(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture Integration Research, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize precision management of wheat crop, a spectral analyzer was developed to diagnose crop canopy nutrition, and the performance experiment was conducted in a wheat field. The system consisted of optical system, signal acquisition driver module and controller. The optical sensor could collect spectral reflectance between 300 nm and 1 100 nm. The signal acquisition driver module was used to provide a stable voltage and A/D conversion. A spectral acquisition and control software was developed to receive, display, process and save the collected data. Calibration experiments and field experiments were carried out in wheat experimental field. The correlation between the result measured by the spectral analyzer and the result of ASD FieldSpec HandHeld 2 were analyzed. The results indicated that high correlation existed between the reflectance datasets detected by the two equipments. The minimum coefficient of correlation was 0.991 8. The correlation between the winter wheat chlorophyll content and reflectance measured by instrument was analyzed. Selecting the higher correlation band at 550 ~ 900 nm, the principal component analysis was applied to establish chlorophyll forecasting model. The determination coefficient R^2 of the calibration model was 0.575 and the R^2 of the validation model was 0.595. Results show that the developed instrument can effectively detect and evaluate chlorophyll content of wheat canopy, and provide theoretical and technical support for the precision cultivation of wheat.

Key words: Crop detection Precision agriculture Normalized difference vegetation index Spectral analyzer

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-19
^{*}北京市科技计划资助项目(D151100004215002)、农业部公益性行业专项资助项目(201303109)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD004)
作者简介: 赵毅,硕士生,主要从事光谱检测传感器技术研究,E-mail: yizhao@cau.edu.cn
通讯作者: 李民赞,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

引言

叶绿素含量是反映作物长势的重要指标,也是确定农田精细施肥管理的重要依据。传统的作物营养检测采用化学分析的方法,尽管该方法检测化学物质含量的准确性较高,但也有很多不足^[1],如成本高、耗时长、操作复杂,且化学试剂的使用容易对环境造成污染。光谱分析技术是根据研究对象中的某一物质对电磁波的吸收特性来进行定量和定性分析的技术^[2]。因此,根据光谱的差异可以检测作物营养含量。

基于光谱分析技术,国内外学者已经开展了大量理论和应用开发研究。理论方面,已经研究了如叶绿素、氮素等营养元素的敏感吸收波长,提出了如归一化植被指数 NDVI (Normalized difference vegetation index)、比值植被指数 RVI (Ratio vegetation index) 等敏感植被指数,应用多种建模方法建立了多种作物营养含量诊断模型^[3-5]。

在理论研究的基础上也指导开发了多种用于作物长势诊断的检测设备。比较有代表性的有美国 ASD 公司 (Analytical Spectral Devices, Inc.) 开发的用于测量地物光谱反射率的系列光谱辐射仪,其中 ASD FieldSpec HandHeld 2 地物波谱仪的波长范围是 325 ~ 1 075 nm。基于敏感波长,俄克拉荷马州立大学开发了地面主动遥感光谱仪 GreenSeeker,通过测量作物冠层红光 656 nm 和近红外 770 nm 处的反射率,并计算出 NDVI、RVI 等植被指数,以反映作物长势状况,或者检测农田信息环境变化情况。国内,研究者开发了多种基于植被指数的便携式作物冠层分析仪,中国农业大学精细农业研究中心先后设计了工作在红光与近红外 2 个波段的作物长势检测仪和基于 4 波段的作物光谱检测传感器^[6-8],通过计算 NDVI 植被指数,检测小麦、玉米等作物叶绿素含量指标。

这些仪器中,诸如 ASD 光谱辐射仪等高光谱仪是通用型设备,价格较高,且仅提供标准数据读取接口,使用者无法直接更改获取波长或为专有应用提供服务。而基于敏感波长设计的 NDVI 仪,大多基于红光与近红外中固定的 2 个或 4 个波段来获取 NDVI 值^[9-11],进而计算氮素、叶绿素含量等指标。然而,胡昊等的研究表明^[12-14],随着作物的生长,作物的“红边”会向长波方向移动,称为红移现象,不同生长期营养元素敏感波长发生变化,表明仅依靠几个固定波长对作物进行诊断,采集信息少,模型适用性有限。因此,为了快速、高效、准确地诊断反映作物长势的叶绿素含量,迫切需要开发具有参数可调、分辨率高、应用简单、成本低廉特点的专用型作

物营养诊断光谱检测仪。

本文基于光电二极管阵列检测器技术,设计一款用于大田冬小麦冠层叶绿素含量指标诊断的光谱检测仪,并对该仪器采集数据的可靠性进行分析,建立大田作物冬小麦叶绿素含量指标诊断模型,以期 为农田精细管理提供数据支持。

1 装置开发

1.1 硬件系统设计

作物冠层营养诊断光谱检测仪由光学传感器、信号采集驱动模块和控制器组成,整体结构如图 1 所示。其中,光学传感器的核心部分为 Carl Zeiss MMS 1 UV/VIS 传感器,图 2a 为光路图,光学传感器通过一根 20 cm 长的光纤采集 300 ~ 1 100 nm 范围内光信号,并经光电二极管阵列检测器进行光电转换。光电二极管阵列选用 HAMAMTSU S3904 型检测器,可以测量 256 个像素点,同时将光纤、光纤截面转换器、凹面成像光栅、二极管阵列以及相应的电路封装在图 2b 所示的机械结构中,具有全封闭、体积小等特点。

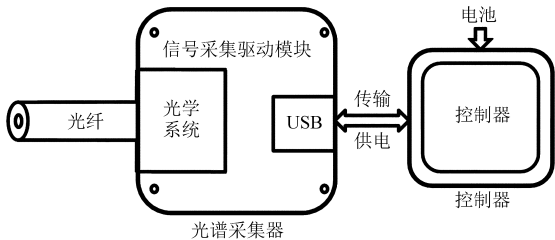


图 1 作物冠层营养诊断光谱监测系统结构图
Fig. 1 Structure of nitrogen nutrition canopy diagnosis system

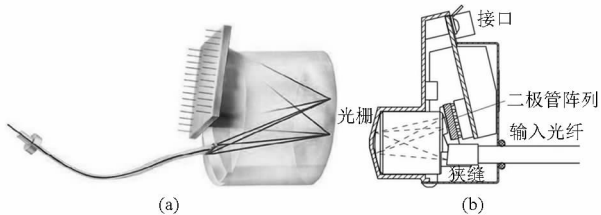


图 2 光学结构示意图
Fig. 2 Optical structure diagram
(a) 光路示意图 (b) 机械结构图

信号采集驱动模块用于为光学系统提供稳定的工作电压并按要求提供驱动时序,主要包括数字信号处理器、运算放大器和外围电路 3 部分。其中,数字信号处理器采用 FREESCALE 公司型号为 PK60N512VLQ100 的高性能处理器;运算放大器选取 ADI 公司的 FET 输入单芯片运算放大器 AD744,它可以实现 16 位分辨率高精度和 500 kHz 高速信号采样,满足小信号的采集需求,同时该模块支持

RS232、USB 2.0 和 EtherNet 通讯接口。外围电路部分主要设计了信号采样滤波电路,用于将模拟信号转换为数字信号。在本系统中,信号通信采用 USB 2.0 协议,一方面通过 USB 2.0 接口与电源相连进行系统供电,另一方面实现与控制器的同步通信。控制器用于安装信息获取控制软件。系统集成优派 116i S2 平板处理器,安装有 Windows 7 系统,采用 intel 1037U 双核处理器,具有 4 GB DDR3 内存,64 GB SSD 固态硬盘,2 个 USB 2.0 接口,内置电池,适合在野外使用,也满足农用车辆平台搭载使用。内嵌信息获取控制软件控制光学系统正常工作,具有光学系统连接、参数设置、系统优化、DN 值采集、反射率采集、显示存储等功能。

1.2 传感器标定

为了将 256 点的光电探测值与相应波长对应,使用标定公式

$$\lambda(n) = C_0 + C_1n + C_2n^2 + C_3n^3 + C_4n^4 \quad (1)$$

其中各项系数: $C_0 = 306.218 \text{ nm}$, $C_1 = 3.31928 \text{ nm}$, $C_2 = 0.000334932 \text{ nm}$, $C_3 = -1.83713 \times 10^{-6} \text{ nm}$, $C_4 = 0 \text{ nm}$, n 表示 256 点中的第 n 点,设第 1 点对应波长为 300 nm。由于相邻两点间隔很近,小于等于 3 nm,因此相邻两点之间采用线性插值算法近似求出两点之间各个波长处的光谱信息。采用理想光放大器模块测试标准增益系数与 Carl Zeiss MMS 1 UV/VIS 传感器标定增益系数,测定结果如图 3a 所示,传感器消除杂散光后的光密度如图 3b 所示。

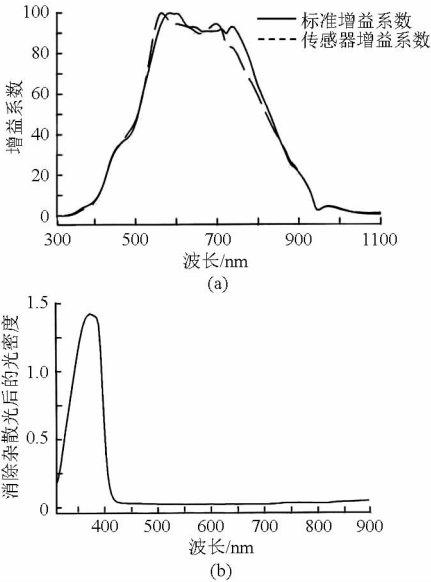


图3 标定测试图
Fig.3 Calibration test charts

1.3 软件系统设计

开发设计了信息获取控制软件,软件应用 Visual Studio 2010,选用 C++ 语言编程开发实现。

该软件是集成光谱数据采集、分析、处理、校正、保存、管理等多种功能的模块化光谱软件平台,包含光谱信息采集控制,采集参数设置和光谱信息分析 3 个模块。功能模块图如图 4 所示。光谱仪的信息采集控制包括 DN (Digital number) 值(各波段的反射或辐射能量)及反射率的采集、显示和存储。软件可以实时显示所采集光谱的数据曲线,并可以存储为 BMP、XLS、TXT 格式。采集参数设置模块可以设置系统的采集模式、采样频率、积分时间和暗电流标定修正。

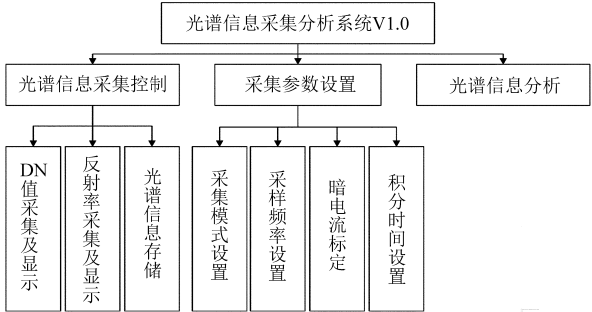


图4 信息获取控制软件功能模块图
Fig.4 Functional block diagram

软件整体流程如图 5 所示。当控制器与信号采集驱动模块成功连接后,首先根据现场环境进行系统优化参数设置,选择定时或手动采集模式,再进行 DN 值或反射率采集功能选择,然后根据不同需求进行测量显示,最后完成数据存储分析。

2 试验结果与分析

2.1 标定试验

为了验证仪器性能,开展了光谱检测仪的标定试验。试验于 2014 年 4 月 20 日在中国农业大学进行,天气晴朗。试验以灰度板为测量对象,灰度板包含 4 块不同灰度的标准板(图 6a)。从 9:00 到 14:00,每 10 min 测量一次,共计 30 组测量值。将 ASD FieldSpec HandHeld 2 光谱辐射仪 (Analytical Spectral Devices, Inc., USA) 和光谱采集装置分别置于灰度板上方 10 cm 处,依次对准 4 个不同灰度的标准板测量反射率,每次测量重复 3 次取平均值。由于光线的变化,在每次测量前都会分别对 ASD 和光谱采集装置测量白板进行优化。

灰度板包含 4 块不同灰度的标准板如图 6a 所示,从白到黑依次用 G1 ~ G4 表示,不同灰度下的标准反射率各不相同。灰度板的说明手册提供了 4 个灰度下 250 ~ 2500 nm 的标准反射率数据,据此绘制出的标准反射率如图 6b 所示。

由于传感器采集的边缘波段会出现波动现象,因此针对 375 ~ 900 nm 波段的测量结果,将作物冠

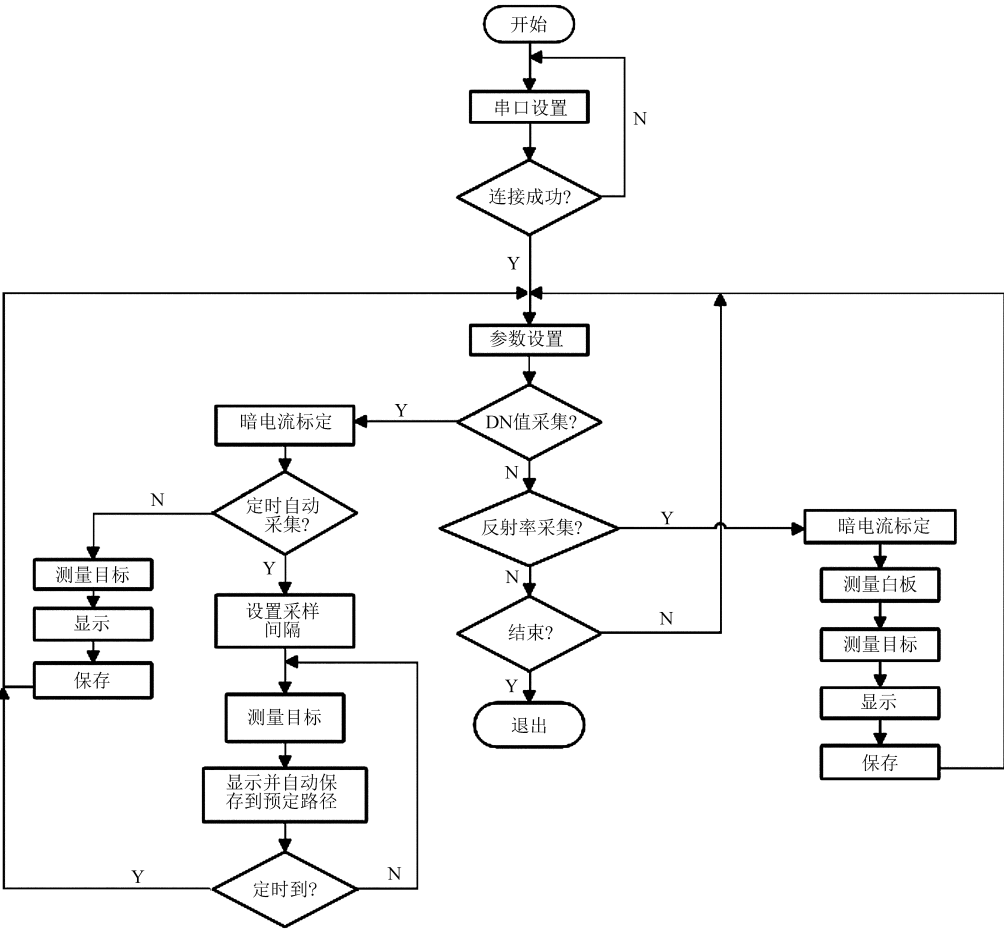


图 5 系统流程图

Fig. 5 Overall flowchart

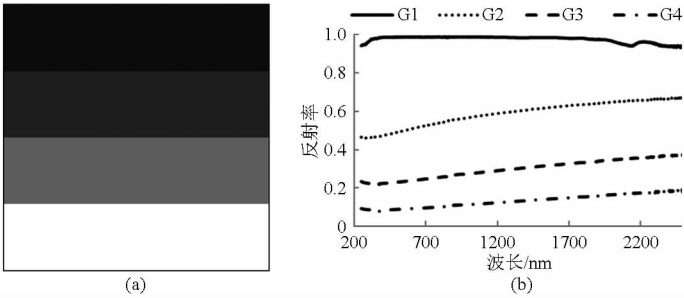


图 6 标定试验

Fig. 6 Calibration experiment

(a) 灰度板示意图 (b) 灰度板的标准反射率

层营养诊断光谱检测系统所测反射率分别与 ASD 所测反射率进行相关性分析,分析结果如表 1 所示。作物冠层营养诊断光谱检测系统测量结果与 ASD 测量结果具有非常高的相关性,相关系数最高为 0.998 0,平均值为 0.964 5。试验结果表明在不同光照情况下自主开发的作物冠层营养诊断光谱检测系统稳定性好,精度高。

2.2 冬小麦试验

试验于 2014 年 3 月 29 日在陕西省杨凌区揉谷镇粮食基地进行,土壤类型以娄土与黄绵土为主。作物为小偃 22 号冬小麦,物候期为拔节后期。试验在 2 块

100 m × 50 m 田间分别选取 120 个采样点,每个采样点分别采用美国 ASD FieldSpec HandHeld 2 光谱辐射仪 (Analytical Spectral Devices, Inc., USA) 和作物冠层营养诊断光谱检测系统进行光谱信息采集,每个采样点反复测量 3 次取平均值作为该采样点的平均值。同步用日本 SPAD - 502Plus 型便携式叶绿素仪测量冬小麦的叶绿素含量指标 SPAD 值。

(1) 作物冠层营养诊断光谱监测系统与 ASD 对比分析

针对结果稳定的 375 ~ 900 nm 波段测量结果,对 2 个仪器测得数据进行相关性分析,相关系数平

表 1 作物冠层营养诊断光谱检测系统所测反射率与 ASD 所测反射率的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients of reflectance measured by canopy nitrogen nutrition diagnosis system and ASD									
时刻	G1	G2	G3	G4	时刻	G1	G2	G3	G4
09:10	0.997 5	0.992 4	0.969 1	0.919 4	12:40	0.997 7	0.988 4	0.953 9	0.862 6
09:20	0.998 0	0.992 5	0.970 9	0.927 2	12:50	0.993 2	0.984 2	0.938 1	0.884 6
09:30	0.997 8	0.995 3	0.974 1	0.943 1	13:00	0.958 0	0.977 6	0.904 9	0.949 0
09:40	0.994 1	0.967 5	0.916 9	0.967 4	13:10	0.996 3	0.981 0	0.948 9	0.926 3
09:50	0.991 0	0.993 7	0.981 2	0.949 5	13:20	0.990 3	0.988 9	0.979 9	0.953 5
11:00	0.987 5	0.992 4	0.972 3	0.904 6	13:30	0.991 9	0.996 5	0.989 9	0.964 3
11:10	0.990 3	0.978 9	0.937 6	0.948 3	13:40	0.970 0	0.974 3	0.946 3	0.964 3
11:20	0.980 0	0.988 4	0.948 9	0.908 8	13:50	0.959 4	0.931 9	0.886 8	0.908 3
11:30	0.993 2	0.972 3	0.958 0	0.918 8	14:00	0.988 8	0.969 7	0.943 3	0.946 2
11:40	0.983 2	0.981 4	0.966 1	0.973 8	14:10	0.993 3	0.996 4	0.980 6	0.975 7
11:50	0.975 5	0.969 5	0.935 8	0.911 3	14:20	0.991 9	0.994 5	0.981 3	0.959 1
12:00	0.995 8	0.981 3	0.941 5	0.921 6	14:30	0.992 2	0.987 8	0.954 4	0.939 6
12:10	0.997 6	0.990 3	0.973 0	0.896 7	14:40	0.987 5	0.978 6	0.914 3	0.903 8
12:20	0.997 4	0.988 2	0.937 4	0.866 9	14:50	0.995 8	0.992 8	0.976 0	0.958 6
12:30	0.996 4	0.996 5	0.986 4	0.945 9	15:00	0.993 8	0.991 4	0.958 7	0.925 9

均值为 0.995 2,最大为 0.997 4,最小为 0.991 8,标准差为 0.001 3。图 7 为相关系数最大的两者的测量结果。结果显示自主开发的作物冠层营养诊断光谱监测系统测量结果与 ASD FieldSpec HandHeld 2 测量结果具有非常高的相关性。在 375 ~ 750 nm 处基本重合,而在 750 ~ 900 nm 处相关系数较低,噪声干扰较大。试验结果表明自主开发的光谱检测仪有较高的可信度。

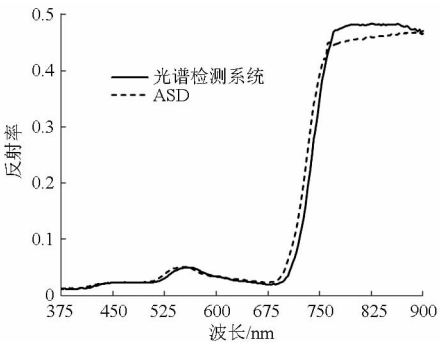


图 7 ASD 和作物冠层营养诊断装置测量结果
Fig.7 Measuring results of ASD and canopy nitrogen nutrition diagnosis system

(2) 植被指数与叶绿素含量相关性分析

将作物冠层营养诊断光谱监测系统所测光谱信息与冬小麦叶绿素含量指标 SPAD 值进行相关性分析,并选出相关性较高的 550 ~ 900 nm 波段进行主成分分析。表 2 显示了主成分的统计信息,特征值由大到小排列,显示了前 3 个主成分方差的百分比及方差累计百分比。前 3 个特征值方差累计百分比为 99.781%,即前 3 个主成分包含了原有多波段的 99.781%的信息,所以选用前 3 个主成分代表原有的多波段与叶绿素含量进行回归分析。

表 2 主成分的总方差

Tab.2 Total variance of main component			
成分	初始特征值		
	初始特征值的	方差百分	方差累计
	合计	比/%	百分比/%
1	201.463	57.397	57.397
2	143.622	40.918	98.315
3	5.145	1.466	99.781

所得主成分计算的 SPAD 值与实测的 SPAD 值之间具有较高的相关性, R 为 0.758。选取 120 个采样点数据集中 90 个数据为标定集,30 个数据为验证集,建立 SPAD 回归模型

$$S = 58.60 - 3.22X_1 + 0.25X_2 + 1.88X_3 \quad (2)$$

式中 S ——冬小麦叶绿素含量预测值

X_1 、 X_2 、 X_3 ——3 个主成分参数值

如图 8 所示,建模集决定系数 R_c^2 为 0.575,验证集决定系数 R_v^2 为 0.595。结果表明应用该模型可对大田冬小麦叶绿素含量进行定量检测,为大田作

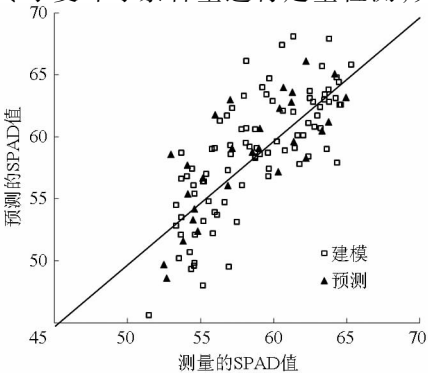


图 8 预测叶绿素与含量指标 SPAD 值之间的建模结果
Fig.8 Modeling results of predicted and measured SPAD values

物长势信息获取提供支持。

3 结论

- (1) 系统硬件包括光学传感器、信号采集驱动模块和控制器 3 部分, 控制软件主要包括接收、处理、显示和存储采集到的数据等功能, 配合控制器软件可以采集 DN 值和冠层反射率。为了满足田间作物营养检测应用的需求, 整套仪器结构简单, 既可手持式测量也可车载移动测量。
- (2) 开展了光谱检测仪与美国 ASD 仪器之间的对比试验, 标定试验表明两者的测量结果具有较

高的相关性, 平均相关系数为 0.964 5。结果表明在不同光照情况下自主开发的作物冠层营养诊断光谱监测系统具有较高的精度和稳定性。

(3) 应用所开发的作物冠层营养诊断光谱监测系统开展田间冬小麦试验, 结果表明自主开发的光谱检测仪与 ASD 测量结果之间具有非常高的相关性, 相关系数最低为 0.991 8。选取了与冬小麦叶绿素含量指标 SPAD 值相关性较高的 550 ~ 900 nm 波段进行主成分回归分析, 并建立了叶绿素含量预测模型, R_c^2 为 0.575, R_v^2 为 0.595, 结果表明本仪器具有一定的预测叶绿素含量的能力。

参 考 文 献

1 Chen Longjian, Yang Zengling, Han Lujia. A review on the use of near-infrared spectroscopy for analyzing feed protein materials [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2013, 48(7):509 – 522.

2 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2006.

3 蒋焕煜, 应义斌, 谢丽娟. 光谱分析技术在作物生长信息检测中的应用研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(6):1300 – 1304.

Jiang Huanyu, Ying Yibin, Xie Lijuan. Application of spectroscopy technique to obtain plant growth information[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(6):1300 – 1304. (in Chinese)

4 何勇, 彭继宇, 刘飞, 等. 基于光谱和成像技术的作物养分生理信息快速检测研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3):174 – 189.

He Yong, Peng Jiyu, Liu Fei, et al. Critical review of fast detection of crop nutrient and physiological information with spectral and imaging technology[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3):174 – 189. (in Chinese)

5 王秀, 赵春江, 周汉昌, 等. 冬小麦生长便携式 NDVI 测量仪的研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4):95 – 98.

Wang Xiu, Zhao Chunjiang, Zhou Hanchang, et al. Development and experiment of portable NDVI instrument for estimating growth condition of winter wheat [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4):95 – 98. (in Chinese)

6 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(2):172 – 177.

Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2):172 – 177. (in Chinese)

7 李修华, 李民赞, 崔笛, 等. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊):252 – 255, 227.

Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di, et al. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.):252 – 255, 227. (in Chinese)

8 钟振江, 李民赞, 孙红, 等. 作物营养智能检测仪设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊 2):215 – 219.

Zhong Zhenjiang, Li Minzan, Sun Hong, et al. Development and application of a smart apparatus for detecting crop nutrition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp.2):215 – 219. (in Chinese)

9 郑文刚, 孙刚, 申长军, 等. 可见-近红外作物氮素光电测量仪开发[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3):178 – 182.

Zheng Wen'gang, Sun Gang, Shen Changjun, et al. Development of a visible-infrared photoelectric instrument for measuring crop nitrogen [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(3):178 – 182. (in Chinese)

10 郝晓剑, 郝丽娜, 刘良云, 等. 智能便携式 NDVI 测量仪[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(3):246 – 248.

Hao Xiaojian, Hao Li'na, Liu Liangyun, et al. An intelligent portable instrument for measuring NDVI [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(3):246 – 248. (in Chinese)

11 倪军, 王婷婷, 姚霞, 等. 作物生长信息获取多光谱传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5):207 – 212.

Ni Jun, Wang Tingting, Yao Xia, et al. Design and experiments of multi-spectral sensor for rice and wheat growth information [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5):207 – 212. (in Chinese)

12 胡昊, 白由路, 杨俐苹, 等. 不同氮营养冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6):1317 – 1323.

Hu Hao, Bai Youlu, Yang Liping, et al. Red edge parameters of winter wheat canopy under different nitrogen levels[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2009, 15(6):1317 – 1323. (in Chinese)

13 代辉, 胡春胜, 程一松. 冬小麦冠层光谱红边特征分析[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5):80 – 83.

Dai Hui, Hu Chunsheng, Cheng Yisong. Red-edge characteristics of winter wheat canopy spectra[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(5):80 – 83. (in Chinese)

14 孙莉, 陈曦, 包安明, 等. 在水分胁迫下棉花冠层叶片全氮含量的高光谱遥感估算模型研究[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(3):315 – 320.

Sun Li, Chen Xi, Bao Anming, et al. Study of the model development for estimating the total N content in cotton leaves and canopies under water stress by using hyperspectral remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology & Application*, 2005, 20(3):315 – 320. (in Chinese)