

作物营养智能检测仪设计与试验*

钟振江 李民赞 孙红 吴李烜 吴倩

(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: 为了快速无损地检测作物生长期营养含量,设计了一套作物营养智能检测仪。该检测仪由控制器和若干光学传感器节点组成,两者之间通过 ZigBee 协议通信。其中,光学传感器节点可分别测量中心波长为 550、650、766 和 850 nm 的太阳光和作物冠层反射光的强度,进而计算光谱反射率和植被指数。应用该仪器检测大田冬小麦叶绿素含量,结果表明应用不同波段组合构建的归一化植被指数与冬小麦冠层叶绿素含量间相关性较比值植被指数高。基于标准白板和太阳光研究了系统的标定方法,相关性分析表明该方法可有效提高归一化植被指数与叶绿素含量之间的相关系数。其中根据 550 和 766 nm 计算所求归一化植被指数与 SPAD 所测叶绿素含量的相关性最高(相关系数为 0.693 9),并建立了叶绿素含量线性预测模型,建模精度为 0.494,检验模型精度为 0.478。

关键词: 作物营养 智能检测 叶绿素含量 植被指数 ZigBee

中图分类号: S237; TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0215-05

Development and Application of a Smart Apparatus for Detecting Crop Nutrition

Zhong Zhenjiang Li Minzan Sun Hong Wu Lixuan Wu Qian

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

Abstract: In order to real-time detect crop nutrition content, a smart apparatus for detecting crop nutrition was developed based on NIR spectroscopy, electronics and ZigBee wireless communication technology. It was designed to work as a wireless sensor network with one control unit and several optical sensor nodes. The incident sunlight and reflective light from crop canopy were measured at the wavebands of 550 nm, 650 nm, 766 nm and 850 nm respectively, and then the canopy reflectance and some vegetative indices were calculated. The field experiments and analyses on crop growth monitoring in wheat fields were conducted. Results showed that the correlation coefficient between NDVI and chlorophyll content was higher than RVI. The chlorophyll content and the vegetation index which was calculated with the reflectance at 550 nm and 766 nm had the highest correlation coefficients (r was 0.693 9), and the prediction model of chlorophyll content was built. The r^2 of the calibration model reached to 0.494, and r^2 of the predicted model reached to 0.478.

Key words: Crop nutrition Intelligent detection Chlorophyll content Vegetation index ZigBee

引言

作物营养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。快速有效的

跟踪和监测表征作物营养水平的氮素、叶绿素等状况,并据此确定科学的施肥管理措施,对提高氮素利用效率、合理利用资源、提高作物产量、改善品质以及保护环境都有重要意义^[1]。传统的作物营养检

收稿日期: 2013-06-28 修回日期: 2013-07-05

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B04)

作者简介: 钟振江,硕士生,主要从事光谱检测传感器技术研究,E-mail: zhong020808@qq.com

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

测方法均采用室内化学分析测量,费时、费力,且需要破坏采样,影响作物生长。由于作物叶片叶绿素含量可直接反映其氮素含量^[2],且叶绿素含量的变化会导致植物叶片或冠层的反射光谱的变化^[3]。因此,可以根据光谱的差异监测作物叶绿素和氮素含量水平。

国内外研究表明,作物叶绿素含量、氮含量均与NDVI(Normalized difference vegetation index)等植被指数相关^[4~5],因此,开发了多种基于植被指数的便携式作物冠层分析仪。具有典型代表性的是 Marvin 设计发明的主动光源式光谱反射率测量传感器与控制器装置 Green Seeker^[6],采集目标红光与近红外作物反射光,根据 NDVI 植被指数分析作物长势。中国农业大学精细农业研究中心先后设计了两代工作在红光与近红外 2 个波段的作物长势监测仪^[7~8],检测作物 NDVI 植被指数。进而开发了基于 4 波段的作物光谱检测传感器^[9],拓展了传感器波段,并可构建多种植被指数。但上述便携式检测仪均需由操作人员手持在田间对采样点测量,不利于大面积农田作物生长的快速、高效检测。

本研究应用 ZigBee 无线传感器网络设计一套作物营养智能检测仪器。整套仪器由 1 台内嵌了无线传输模块的 PDA 与若干个光学传感器节点通过 ZigBee 无线通信网络构成。采用 4 波段光学传感器作为网络的路由节点,分布式安装在农用车载机械结构上,实现大田作物长势信息的高效采集,为农田精细管理提供数据支持。

1 作物营养智能检测仪设计

1.1 总体结构

作物营养智能检测仪器系统由控制器和光学传感器节点通过 ZigBee 无线组网通信构成,根据不同作业需求可以使用不同数量的光学传感器节点进行同时采集。每个光学传感器节点结构相同,分别在 550、650、766 和 850 nm 4 个波长处同时采集作物冠层的反射光和太阳入射光。控制器为内嵌 ZigBee

无线通信模块的 PDA,负责 ZigBee 无线通信网络的管理,接收显示存储各个光学传感器节点采集的光谱数据,并可通过内嵌的 GPRS 模块与远程服务器通信。

1.2 光学通道设计

光学传感器节点由采集太阳入射光强的上部 4 个通道和采集作物冠层反射光强的下部 4 个通道组成。上、下 8 个通道分别在相同的波段处对太阳光与作物反射光进行测量,用以计算作物冠层的反射率。光学通道基本结构如图 1 所示,主要由凸透镜、滤光片、光电探测器以及机械外壁组成。此外,上部 4 个通道外侧增加了毛玻璃用以降低太阳光入射角度变化带来的影响。

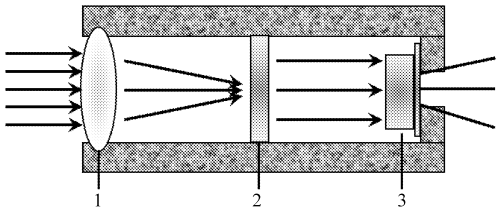


图 1 光学通道基本结构示意图

Fig.1 Structure diagram of basic optical channel

1. 凸透镜 2. 滤光片 3. 光电探测器

光学传感器滤光片可根据不同被测作物的特点更换,测量不同波段的光谱信息,以达到检测目的。在本仪器中,4 个通道内滤光片分别选择了中心波长为绿色植物可见光主要反射峰 550 nm、可见光主要吸收波长 650 nm 和 2 个近红外波长 766、850 nm,带宽均为 20 nm。光电探测器选择了 PIN 型 Si 光电二极管,探测器的感应面积为 3.5 mm×3.5 mm,光感波长范围为 400~1 100 nm。凸透镜选择直径为 12.5 mm、焦距 12.5 mm 的双凸透镜,以扩大探测的目标范围。

1.3 硬件电路设计

作物营养智能检测仪由光学传感器和控制器两部分构成,其硬件结构如图 2 所示。其中,光学传感器由光学通道、信号调理电路、微控制器和相应外围电路组成。光学通道将光信号转换成电信号输出,

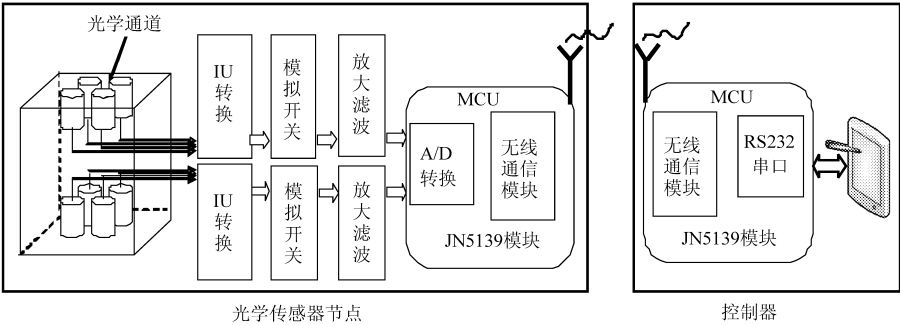


图 2 硬件结构示意图

Fig.2 Block diagram of hardware structure

微弱电信号经过 IU 转换,滤波放大,再由 A/D 转换变成数字信号进入微控制器,最终由无线模块发送。

光学传感器节点的微控制器采用英国 JENNIC 公司的 JN5139 - Z01 - M03R1 型模块,该模块集成了 32 位 RISC 微处理器,内置 4 路 12 位 A/D 转换器及 128 KB 的 Flash 存储器,满足信号采集处理要求。同时,它还内嵌了 ZigBee 无线通信协议及天线接口,可以实现无线快捷组网通信功能。为了简化硬件设计,还采用 4:1 模拟开关 ADG704 对 4 路光电信号进行选择,实现放大电路的分时复用,放大电路采用 3 V 单电源供电的低功耗运算放大器 OPA333。

控制器为一台内嵌 ZigBee 模块的掌上电脑 PDA。PDA 经过改造通过 RS232 串口与 ZigBee 模块相互通信,该 ZigBee 模块作为 ZigBee 网络的协调器,负责建立管理无线网络并接收其他 ZigBee 节点发送的数据。控制器可实现数据的显示、分类管理,通过扩展 GPRS 模块与远程服务器端进行通信。

1.4 系统软件设计

系统软件主要包括基于 JN5139 模块的光学传感器节点的程序设计和控制器软件设计两部分。每个传感器节点作为无线传感器网络中的终端节点,具有相同的功能和软件流程。图 3 为光学传感器节点的软件流程图。传感器节点上电后进行初始化,接着自动搜索网络并加入网络,通过定时器中断定时采集光谱信号,采集完毕通过无线模块发送给协调器。协调器程序启动后初始化 ZigBee 协议栈和硬件设备,自动搜索并建立网络,接收网络中所有终端节点发送的数据并通过串口发送至控制器。

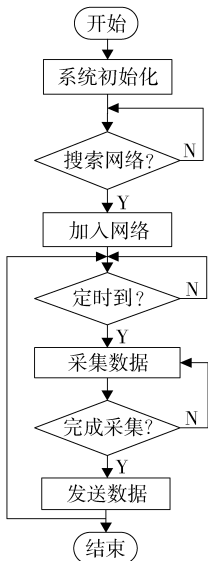


图 3 测量单元软件流程图

Fig. 3 Flow chart of software in optical sensor node

2 基于作物营养智能检测仪的冬小麦叶绿素含量检测

2.1 材料与方法

2.1.1 田间试验

试验于 2013 年 3 月 30 日至 4 月 1 日在陕西省杨凌区揉谷镇粮食基地进行,土壤类型以姜土与黄绵土为主。冬小麦种植品种为小偃 22 号,物候期为拔节后期。试验在 1 000 m × 600 m 区内选取 25 个采样区(图 4)。在每个采样区采集小麦冠层叶片反射光谱数据并测量相应冠层叶片的叶绿素含量,同步记录当前采样点的 GPS 位置信息。

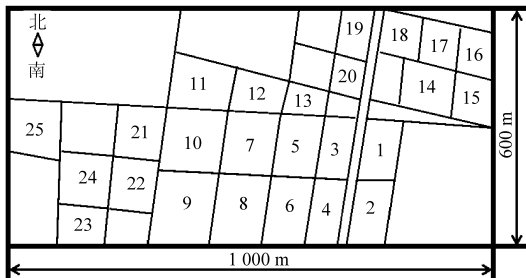


图 4 试验区分布图

Fig. 4 Experimental areas map

叶绿素含量采用日本 SPAD - 502Plus 型便携式叶绿素仪测量,GPS 采用 G738CM 型手持式 GPS 接收系统(北京合众思壮)。自主研发的作物营养智能检测仪垂直置于被测冬小麦冠层上 25 cm 处,于每天 10:00 ~ 16:00 采集 550、650、766 和 850 nm 的太阳光和冬小麦冠层反射光谱数据。每个采样区选择 3 个采样点,每个采样点测量 10 次求平均值。

2.1.2 植被指数计算与仪器标定

依据可见光与近红外光的不同组合,分别计算比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)^[10]作为作物营养含量检测参数。RVI 和 NDVI 计算公式为

$$R_{RVI} = \frac{R_{nir}}{R_r}$$
 (1)

$$R_{NDVI} = \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r}$$
 (2)

式中 R_{nir} ——近红外光特征波长处的植被反射率
 R_r ——可见光特征波长处的植被反射率

若传感器测得可见光特征波长处太阳入射光的电信号为 E_s 、对应波长植被反射光的电信号为 E_p 、近红外光特征波长处太阳入射光的电信号为 E_{nirs} 、对应波长植被反射光的电信号为 E_{nirp} ,则有

$$R_{nir} = k_{nir} \frac{E_{nirp}}{E_{nirs}}$$
 (3)

$$R_r = k_r \frac{E_p}{E_s}$$
 (4)

式中 k_{nir} 和 k_r 为比例常数,由装置的光学系统、光电探测器及其适配放大器的特性参数决定。

设 $K_w = \frac{k_{nir}}{k_r}$,则可推导基于光学传感器的 RVI 和 NDVI 计算公式分别为

$$R_{RVI} = K_w \frac{E_{nirp} E_s}{E_p E_{nirs}}$$

(5)

$$R_{NDVI} = \frac{K_w E_{nirp} E_s - E_p E_{nirs}}{K_w E_{nirp} E_s + E_p E_{nirs}}$$

(6)

为尽可能消除光学传感器的光学系统、光电探测器及其适配放大器系统误差及太阳光照变化对测量结果的影响,研究了系统的标定方法。由于标准白板 NDVI 值为零,因此根据可见光和近红外光的不同组合,在每个采样点测量前测量标准白板进行标定,即可确定装置标定的系数 K_w ,计算公式为

$$K_w = \frac{E_p E_{nirs}}{E_{nirp} E_s}$$

(7)

2.2 试验结果分析

2.2.1 植被指数与冬小麦冠层 SPAD 值相关性分析

25 个试验区中 75 个采样点的 SPAD 值在 [44.9,64.1] 区间变化,均值为 54.524,标准差为 4.2。结合 GPS 测量结果绘制冬小麦冠层 SPAD 值分布图,如图 5 所示。由于试验区内冬小麦由多家农户分散种植和管理,作物长势差异明显,总体而言,东北侧农田冬小麦冠层叶绿素含量高于西南侧采样区,说明东北侧作物群体长势好于西南侧。其中,第 14~18 采样区冬小麦长势较优,SPAD 均值达到 61.17;第 23~24 采样区冬小麦长势较差,SPAD 均值为 47.96。

依据可见光与近红外光的不同组合,分别构建的 NDVI 和 RVI 植被指数有 NDVI (550, 850),

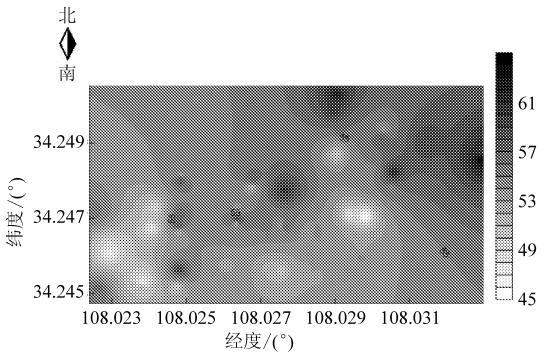


图 5 农田 SPAD 值分布图
Fig. 5 Distribution of SPAD of wheat

NDVI (550, 766), NDVI (650, 850), NDVI (650, 766), RVI (550, 850), RVI (550, 766), RVI (650, 850) 和 RVI (650, 766)。各 NDVI 值在 [0,1] 之间变化,其中 NDVI (650, 850) 均值最高,为 0.797,值在 [0.66,0.924] 区间变化;NDVI (550, 766) 均值最低,为 0.615,值在 [0.49,0.72] 之间。各 RVI 取值变化范围在 [2,19] 之间,其中 RVI (650, 850) 均值最高,为 9.565;RVI (550, 766) 均值最低,为 4.30。

分析各植被指数与 SPAD 值之间的相关性,结果如表 1 所示。由表可知,总体而言,相同波长组合求得的 NDVI 与 SPAD 值的相关系数均高于 RVI 与 SPAD 值的相关系数,且在 4 种波长组合中,550 nm 和 766 nm 波长组合所计算的植被指数与 SPAD 值之间的相关系数均高于其他波长组合。分析可知,在田间连续的测量过程中,尽管太阳光照等条件变化,但与 RVI 相比 NDVI 能更为有效地消除与太阳角、云阴影和有关辐照度的影响,对冬小麦营养的响应具有较高的鲁棒性。NDVI (550, 766) 比其他植被指数更适于对冬小麦拔节后期的叶绿素含量进行检测。

表 1 植被指数与 SPAD 值之间的相关性分析

Tab.1 Coefficient of determination between vegetation index and SPAD value		NDVI	NDVI	NDVI	NDVI	RVI	RVI	RVI	RVI
参数	标定方法	(550, 850)	(550, 766)	(650, 850)	(650, 766)	(550, 850)	(550, 766)	(650, 850)	(650, 766)
叶绿素含量	无校正	0.620 9	0.622 1	0.515 1	0.417 2	0.593 7	0.594 3	0.455 8	0.359 7
	白板校正	0.670 3	0.693 9	0.643 0	0.578 5	0.554 4	0.588 6	0.497 9	0.452 7

进而分别分析了未进行系统标定(无 K 值校正,即 $K=1$,记作 $NDVI_1$)和系统标定后(采用 K 值校正,记作 $NDVI_k$)的各植被指数与 SPAD 值之间的相关性。由表 1 可知,经过 K 值校正之后,各 NDVI 值与 SPAD 值的相关系数均有所提高,NDVI_k (650, 766) 与 SPAD 值的相关系数提高最大,由 0.417 2 提高到了 0.578 5,此外 NDVI_k (550, 766) 与 SPAD 值的相关系数由 0.622 1 提升到 0.693 9,说明采用 K 值参数校正的方法进行标定可有效提高作物营养智

能检测仪对冬小麦叶绿素含量的检测精度。
绘制 NDVI_k (550, 766) 值分布图如图 6 所示,东北侧的 NDVI_k (550, 766) 值普遍高于西南侧,其中 NDVI_k (550, 766) 在 14~18 采样区最高达 0.72,23~24 采样区最低为 0.49。上述分析结论与图 5 所示 SPAD 值分布结果一致。结果说明,应用所开发作物营养智能检测仪采集田间作物冠层 NDVI_k (550, 766),并生成分布图,可直观反映田间作物整体营养分布。依据分布图可有针对性地对营

养水平较低、长势情况较差的区域进行精细追肥管理,提高冬小麦产量。

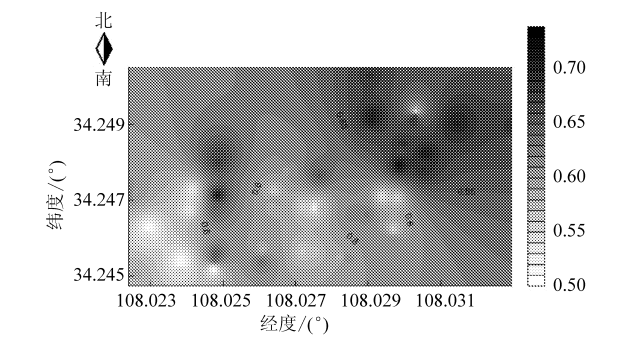


图 6 农田 NDVI 分布图
Fig. 6 Distribution of NDVI of wheat

2.2.2 冬小麦叶绿素含量检测模型

依据上述相关性分析结果,选取 $NDVI_k(550, 766)$ 作为参数对冬小麦叶绿素含量进行检测。选取 75 个采样点数据集中 55 个数据为标定集,20 个数据为验证集,建立 SPAD 回归模型,即

$$y = 50.04x + 23.74 \quad (8)$$

式中 y ——冬小麦叶绿素含量预测值
 x —— $NDVI_k(550, 766)$ 参数值

如图 7 所示,建模精度为 0.494,检验模型精度为 0.478。结果表明,应用该作物营养智能检测仪可对大田冬小麦叶绿素含量进行定量检测,可为大田作物长势信息获取提供支持。

3 结论

(1) 作物营养智能检测仪采用 ZigBee 技术实现了控制器和光学传感器节点之间的无线通信,并

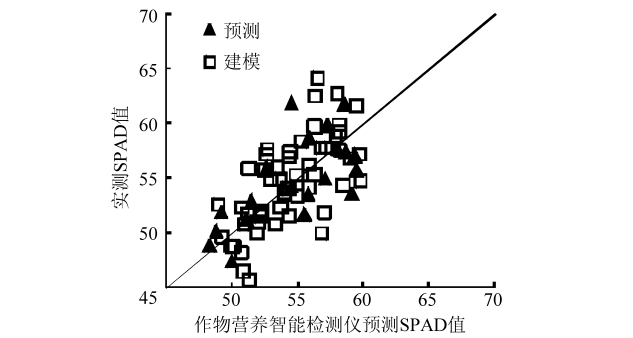


图 7 预测叶绿素与实测 SPAD 值之间的建模结果
Fig. 7 Correlation between measured chlorophyll content and predicted chlorophyll content in crop leaves

可同步采集在可见光和近红外 4 个波长处太阳光照和作物冠层的反射光强,计算 NDVI 植被指数用于预测作物冠层叶绿素含量。适合在野外田间操作使用。

(2) 计算并分析了依据可见光与近红外光的不同组合所求的 NDVI 和 RVI 植被指数,结果表明 NDVI 比 RVI 更适合对冬小麦拔节后期的叶绿素含量进行检测,通过 550 nm 和 766 nm 这两个波长计算得到的 NDVI 值与叶绿素含量之间的相关性最高,相关系数达到 0.693 9。

(3) 由于光学器件不同特性差异,光电探测器及其适配放大器系统误差及太阳光照变化等影响,通过对标准白板进行测量来校正所求 NDVI 值能有效提高仪器的测量精度。

(4) 对叶绿素含量与 $NDVI_k(550, 766)$ 进行回归建模分析,建模精度 r_c^2 为 0.494,检验模型精度 r_v^2 达到了 0.478,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 王康,沈荣开,唐友生. 用叶绿素测定值(SPAD)评估夏玉米氮素状况的实验研究[J]. 灌溉排水,2002,21(4):1~3.
- 2 Filella I, Serrano L, Serrab J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis[J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1400~1405.
- 3 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,2006:180~194.
- 4 Huang Chengwei, Huang Chunchi, Wu Tehui, et al. Determination of nitrogen content in rice crop using multi-spectral imaging[C]//2003 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 031132, 2003.
- 5 孙雪梅,周启发,何秋霞. 利用高光谱参数预测水稻叶片叶绿素和籽粒蛋白质含量[J]. 作物学报,2005,31(7):844~850. Sun Xuemei, Zhou Qifa, He Qiuxia. Hyperspectral variables in predicting leaf chlorophyll content and grain protein content in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(7):844~850. (in Chinese)
- 6 Marvin L S, Duane N, John B S, et al. Optical spectral reflectance sensor and controller, US: 6596996 B1[P]. 2003-07-22.
- 7 张喜杰,李民赞,崔笛,等. 温室作物长势的光谱学诊断方法研究与仪器开发[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(5):887~890. Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di, et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(5): 887~890. (in Chinese)
- 8 李修华,李民赞,崔笛. 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. 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)
- 9 李修华,张锋,李民赞,等. 四波段作物冠层分析仪的开发[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)
- 10 杨述平. 归一化植被指数测量技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2004,12(3):328~332.