

基于透射光谱的玉米叶片含水率快速检测仪研究

孙红¹ 陈香¹ 孙梓淳¹ 李民赞¹ 张漫¹ 吴静珠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. 北京工商大学食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 为快速、无损检测玉米叶片含水率,根据透射光谱原理设计一款便携式植物叶片水分快速检测仪。检测仪主要由数据采集节点和数据接收节点两部分组成,数据采集节点采用夹持叶室结构,由信号采集、处理和发送模块组成,数据接收节点由信号接收模块和 PDA 组成。测量时玉米叶片被放入采集节点的夹持叶室,两路 LED 主动光源(890 nm 和 980 nm)发光照射叶片,采用 PIN 型 Si 光电传感器在叶片的另一面进行透射光探测,透射光信号经调理电路放大、滤波后,通过 ZigBee 网络发送至数据接收节点。根据采集的光信号计算透射率(T_{890} 和 T_{980})、比值植被指数(RVI)和调整型归一化差异水分指数(MNDWI)等参数,分析了各植被指数与不同叶位含水率之间的相关性,结果显示仪器应用的最佳叶位为完全展开叶片的倒二叶中部,含水率检测范围为 70% ~ 80%,且分辨率为 0.3%。选取了 T_{890} 、 T_{980} 和 MNDWI 建立了含水率检测模型,其 R_c^2 为 0.854, R_v^2 为 0.849, RMSE 为 0.010 3。

关键词: 玉米叶片; 含水率; 近红外光谱; 透射法; 植被指数

中图分类号: S237; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0173-06

Rapid Detection of Moisture Content in Maize Leaves
Based on Transmission Spectrum

SUN Hong¹ CHEN Xiang¹ SUN Zichun¹ LI Minzan¹ ZHANG Man¹ WU Jingzhu²

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

2. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to detect the moisture content of maize leaves quickly and nondestructively, a portable plant leaf moisture detector was developed based on near infrared spectroscopy and wireless sensor network. The structure was designed according to the principle of transmission spectrum. The device could be divided into data acquisition node and data receiving node. And the ZigBee network was used to transfer the data between them. There were three modules in the data acquisition node, including a signal acquisition module, a signal processing module and a signal transmission module. The data acquisition node mainly completed the acquisition, amplification and filtering of the spectral data, and then sent it to the PDA through the master chip JN5168. The data receiving node was designed with a data receiving module and a PDA. The signal acquisition module was the key component with a light source and a sensor. The active LED lights in near-infrared band (890 nm and 980 nm) sent light, and the PIN type photodiode was used to measure the transmission signal. After the signal amplification and filtering, it was sent to the data receiving node by the ZigBee network. The parameters were calculated, including T_{890} , T_{980} , ratio vegetation index (RVI), modified normalized difference water vegetation index (MNDWI) and so on. The field test was conducted. The correlation between the parameters and water content was analyzed. The best application location of maize leaves was recommended. The results showed that the best detecting range was 70% ~ 80% and the resolution was 0.3%. The detection model was established by T_{890} , T_{980} and MNDWI, with $R_c^2 = 0.854$, $R_v^2 = 0.849$, and root mean square error of 0.010 3. It could help to detect leaf moisture content nondestructively in the field.

Key words: maize leaves; moisture content; near infrared spectroscopy; transmission; vegetation index

收稿日期: 2017-11-10 修回日期: 2017-12-20

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)和重点实验室开放课题项目(BKBD-2017KF03、KF2018W003)

作者简介: 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

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

0 引言

水对植物生长至关重要,水分亏缺将影响植物的蒸腾、呼吸和光合作用,从而影响植物的生长、产量和品质^[1-3]。植物叶片含水率是反映植物胁迫程度的重要指标。快速、高效、准确、无损地检测植株叶片含水率对研究作物抗旱性以及实现精准农业具有重要意义^[4-5]。

传统含水率检测采用干燥法,虽然检测精度高,但具有破坏性,且检测周期长,无法实时在线检测。近年来近红外光谱技术以其快速、高效、绿色、无污染等特点广泛应用于农业、工业、食品等领域^[6-8]。近红外光谱主要是含氢基团 $X-H(X=C、N、O)$ 分子振动的倍频和合频吸收,不同物质对近红外光的吸收波长都有明显差别,因此通过分析被测物的透射或反射光谱,可以确定组分含量^[9-11]。大量研究证实水分子主要吸收波段在 760、970、1 145、1 450、1 940 nm 附近,这些波长被广泛用于含水率检测^[12-17]。980 nm 是水分二倍频吸收波段,因此本文选用 980 nm 作为水分敏感波段,在植物反射光谱曲线中 890 nm 附近达到最高峰,说明此处光谱受物质影响极弱,因此本文选用 890 nm 作为参比波段。

GAO^[18] 基于 1 240 nm 对水分变化的敏感性和 860 nm 处响应的不敏感特征,提出归一化水分指数 NDWI。PEÑUELAS 等^[19] 利用 $WI(R_{970}/R_{900})$ 与 $NDVI((R_{900} - R_{680})/(R_{900} + R_{680}))$ 的比值预测植物叶片、植株和植物冠层的含水率和水势。程晓娟等^[20] 利用增强型植被指数 EVI 和归一化差值植被指数 NDVI 的乘积构建了一种新指数 NDVI#,其中蓝波段采用 470 nm,近红外采用 860 nm,短波红外着重分析 1 240、1 450、1 950、2 500 nm 4 个波段,分析发现 1 450 和 1 950 nm 2 个波段组合植被指数 NDVI#与水分相关性最高,抗饱和性最强。在植物含水率检测研究中,由于单一波段易受物质结构和外界环境变化的干扰,研究表明将 2 个或 2 个以上的波长组合成不同植被指数可以提高光谱预测能力。

在便携式植物含水率光谱学诊断仪器开发方面,白路军^[21] 采用 1 780、1 940、2 100 nm 开发了近红外水分监测仪,检测烧结混合物料的含水率。韩书庆等^[22] 通过筛选的 650、940、975 nm 采用 LED 光源设计了便携式叶绿素、氮素、水分一体化设计。JIA 等^[23] 基于反射法利用 680、900、970 nm 对水分进行检测。尽管上述研究体现了光谱学原理指导开发便携式水分诊断仪的可行性,但目前还没有一款成熟的作物叶片含水率检测系统。

本文采用透射光学结构,设计一套基于近红外透射光谱的玉米叶片水分快速诊断装置,以及数据采集、传输和管理的软硬件系统,并进行玉米叶片水分诊断应用测试和分析,为玉米生长期水分管理和抵抗水分胁迫的能力评价提供支持。

1 系统设计

1.1 系统总体设计

为实现操作轻便,同时考虑用户后续可能扩充数据采集节点的需求,作物叶片含水率检测仪由数据采集节点和数据接收节点两部分组成,二者通过 ZigBee 网络无线通信,总体结构如图 1 所示。数据采集节点由信号采集模块、信号处理模块、信号发送模块和电源管理模块组成。其中信号采集模块主要由叶片夹持结构、光源和光电传感器组成,叶片夹持结构是根据玉米叶片形状以及光路结构设计开发,可以形成暗室以便进行光谱测量。电路部分主要完成双路光谱数据的采集,并对采集的信号进行放大、滤波处理,然后通过主控芯片发送至数据接收节点。数据接收节点由信号接收模块和 PDA 组成,主要完成数据的接收、显示、查看、存储和删除等功能。

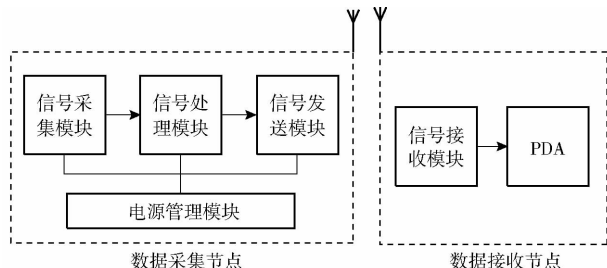


图 1 植物叶片含水率检测系统整体框图

Fig. 1 Diagram of plant leaves moisture content detection system

1.2 透射率计算方法

依据朗伯-比尔定律(Beer-Lambert law),当一束平行单色光垂直通过某一均匀非散射的吸光物质时,其吸光度 A 与吸光物质的浓度 c 及吸收层厚度 b 成正比。比尔-朗伯定律数学表达式为

$$A = \lg \frac{1}{T} = Kbc \quad (1)$$

式中 T ——透射比,即透射光与入射光强度之比

K ——摩尔吸收系数,与吸收物质的性质及入射光的波长 λ 有关

单一波段易受外界光强、叶片生理结构变化等因素的影响,因此对水分探测采用双波段透射法,选用 890 nm 作为参比波段,980 nm 作为水分预测波段。当光线照射叶片,叶片水分对入射光具有吸收特性且摩尔系数一定,透过光即为未被吸收的部分,它受叶片厚度(即光程)和水分浓度的影响。采用

透射法进行植物叶片含水率检测,根据式(1)得到光谱透射率计算公式为

$$T_r = \frac{T_i - a}{T_o - a} \tag{2}$$

式中 T_r ——透射率 T_i ——透射光强
 T_o ——入射原始光强
 a ——密闭条件下暗电流

1.3 光学通道设计

根据透射光谱探测原理,设计了玉米叶片光路结构(图 2)和夹持结构(图 3)。该夹持结构由上、下两部分组成,上半部分用于固定 LED 光源,波长特性分别为 $(890 \pm 10) \text{ nm}$ 和 $(980 \pm 10) \text{ nm}$;下半部分用于固定光电传感器,光源和传感器中心位于同一轴线上,通道直径 12.5 mm 。光电传感器选用 PIN 型 Si 光电二极管,感光面积 $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$,可以采集 $400 \sim 1\,100 \text{ nm}$ 范围的光信号, 890 nm 和 980 nm 在其响应峰值范围内。

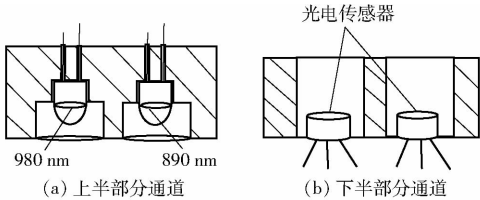


图 2 双波长透射光学结构

Fig.2 Double wavelength transmission optical structure

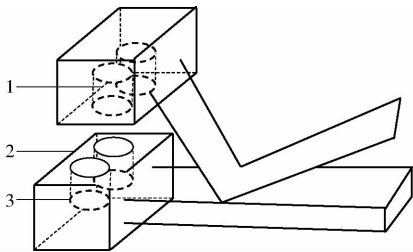


图 3 叶片夹持结构示意图

Fig.3 Structure sketch of blade holding

1. 光源 2. 叶片 3. 光电传感器

结构整体采用 ABS 黑色材料,在上下夹持部件与叶片接触部位安装有垫圈,既能保护叶片不被夹伤,同时又增强了密闭效果,最终形成密闭测量室用于隔绝外界光强干扰。

1.4 电路设计与实现

针对大田和温室应用条件下对便携式设备功耗低、体积小的应用需求,主控芯片采用恩智浦公司开发的 JN5168 型无线微控制器模块,尺寸 $16 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$,配置高性能 32 位 RISC 处理器,模块内嵌 4 路 12 位 A/D 转换器、256 kB 的闪存、32 kB RAM 和 4 kB EEPROM。同时片上还具有一个符合 IEEE802.15.4 2.4 GHz 标准的 ZigBee 网络无线收发器,在无障碍物情况下传输距离最远可达

1 km。基于该主控芯片设计硬件系统总体如图 4 所示。

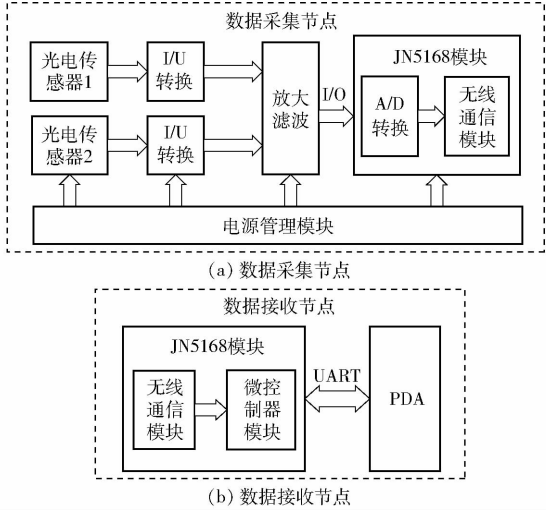


图 4 含水率检测系统整体硬件结构示意图

Fig.4 Hardware structure sketch of moisture content detection system

光电传感器采集电流信号范围为 $0 \sim 200 \mu\text{A}$,为了剔除微弱信号中的噪声干扰,首先采用 CA3140 完成数据 I/U 转换,将电流信号转换为电压信号;进而采用 LM358 完成滤波、放大处理,。CA3140 和 LM358 的工作电压为 5 V ,均为单极性电源供电。

假定作物叶片厚度即为光程,光程越大透射光强度越小。不同植物叶片厚度不同,因此为了便于后续应用调节寻找适于玉米叶片测量的工作电流,在设计 LED 供电电路时采用可调节的电流源,电流调节范围为 $10 \sim 25 \text{ mA}$ 。电源选用 $2\,300 \text{ mA} \cdot \text{h}$ 的可充电扁平锂电池,电源管理芯片选用三端稳压集成电路 LM3171 和 LM7805。其中,LM317 是三端可调正电压直流稳压器,输出电压范围 $1.25 \sim 37 \text{ V}$,最大输出电流 1.5 A ,通过 LM3171 转换得到恒流源给 LED 供电,保证 LED 持续稳定发光。LM7805 输入端接 $7.4 \text{ V}/2\,300 \text{ mA} \cdot \text{h}$ 锂电池,经过 LM7805 转换输出 5 V 恒压源,给其他电路模块供电,保证各模块正常工作。

此外,主控芯片 JN5168 工作电压为 3.3 V ,采用 LP2985AIM5-3.3 芯片将 5 V 转换为 3.3 V ,为微控制器 JN5168 提供工作电压。

1.5 软件功能设计与实现

数据采集节点和数据接收节点二者通过 ZigBee 网络无线通信,采用点对点传输协议,传输协议选用 IEEE802.15.4。数据采集节点首先进行网络初始化,等组网成功开始数据采集。数据接收点软件流程如图 5 所示。

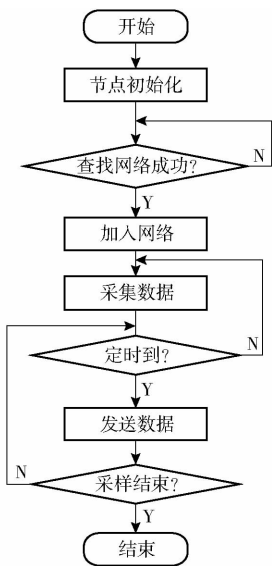


图 5 数据采集节点网络流程图
Fig. 5 Network flowchart of data collection node

2 试验结果与分析

2.1 试验材料

试验时间为 2016 年 7 月 2—9 日,试验地点位于北京中关村生命科学园先正达试验连栋玻璃温室内,试验选用直径为 26.5 mm,高度为 33.0 mm 的盆栽花盆进行栽培种植,栽培基质包含 KLASMANN 草炭、神农草炭和珍珠岩,比例为 4:4:1,底肥使用奥绿缓释肥,其中氮磷钾的比例为 15:9:12。试验样本分布为 15×3(行×列),总计 45 棵。当玉米植株生长到 V4 期,进行 15 个梯度的干旱胁迫处理,具体方案为:第 1 天,第 15 行停止浇水;第 2 天,第 14 行停止浇水,此时第 15 行停止浇水 2 d;第 3 天,第 13 行停止浇水,此时第 15 行停止浇水 3 d,第 14 行停止浇水 2 d,依此类推直到第 2 行结束,第 1 行作为参照不做胁迫处理。

为了分析不同展开叶和相同展开叶不同叶位厚度变化导致光程不同对试验结果的影响,每棵玉米植株均选取顶端倒一叶(叶 1)和倒二叶(叶 2)完全展开叶作为试验样本,在每个叶片样本一侧选取上中下 3 个部位,每个部位长 10 cm,分别测量 3 个部位的光谱数据和含水率。

2.2 光谱数据采集

试验从第 15 行开始依次采集光谱数据和水分数据采集,利用植物含水率检测仪检测装置,采集植物叶片透射光谱数据,考虑叶片每个部位为长 10 cm 的区域,故在每个部位随机均匀采集 5 个点的光谱数据,将 5 点数据取平均作为该部位光谱值。

2.3 鲜重含水率

叶片鲜重含水率采用干燥称量法测量。将叶片

检测部位沿叶脉剪下,剪取上中下 3 个 10 cm 的长条,采用精度为千分位的电子秤称量叶片质量,记为新鲜叶片质量 m_F ,再将叶片放入无菌水中饱和吸水 24 h,放入温度为 80 ℃ 的恒温箱中干燥至恒定质量,取出称量记为 m_D 。鲜重含水率计算公式为

$$W = \frac{m_F - m_D}{m_F} \times 100\% \tag{3}$$

2.4 数据统计分析

由于称量过程中的失误,有 9 个样点没有得到数据,最终的样本总数为 261。

为了尽可能避免不同展开叶结构和叶位的厚度导致的光程不同对实验结果的影响,分别对不同采集部位的鲜重含水率进行统计分析,结果如表 1 所示。叶 1 和叶 2 的含水率均值与总体样本均值为 77.5%(叶 1)、77.3%(总体)、77.1%(叶 2),叶 1 与叶 2 分别为倒 1 和倒 2 展开叶,由于植株体水分由根部向上输送,叶片顶端蒸腾作用会导致叶 1 水分参数变化较为显著;尽管倒 2 叶水分较总体均值低,但数据较为稳定。依照叶片部位分析,部位 1、部位 2 和部位 3 平均含水率分别为 77.6%、77.3% 和 77.0%,部位 1 含水率均值大于等于总体样本均值(77.3%),部位 2 与总体样本值相等,部位 3 较总体样本值低。同时部位 2 含水率的最大最小值也与样本总体值相差较小,这一结果说明该部位更能代表整体植株含水率。综上,在使用仪器测量时应尽量选择叶 2 部位 2 的位置,即倒二叶中间部位。

表 1 不同部位鲜重含水率统计分析结果
Tab.1 Statistical analysis result of fresh moisture content in different parts %

样本点	均值	最大值	最小值
总体	77.3	85.4	70.0
叶 1	77.5	84.8	70.0
叶 2	77.1	85.4	71.1
部位 1	77.6	85.4	70.7
部位 2	77.3	84.8	70.0
部位 3	77.0	83.8	71.6

2.5 透射率随含水率变化趋势分析

分析透射光信号随含水率变化的趋势,绘制总体样本鲜重含水率和透射率的散点图如图 6 所示。总体而言, T_{980} 和 T_{890} 随含水率变化呈 V 型趋势,既在 70%~80% 含水率内透射率随含水率的增加呈现下降趋势,在含水率 80% 附近出现拐点,当含水率在 80% 以上时,透射率随着含水率增加而增加。分析出现拐点的可能原因:一方面含水率对近红外光谱的吸收存在饱和效应,另一方面含水率浓度增加,叶片内部其他元素含量被稀释,依据 ±10 nm 的带宽,实际上

该波段内的光谱响应是包含水分在内的多种元素吸收的综合作用,当其他元素在该整体范围的吸收作用降低后,假设以叶片为容器,容器中水份含量越高,小光程下透光性越高,因此随着含水率的增加其透射光谱反而呈上升趋势。由此认为该仪器对玉米叶片含水率的检测限在 70% ~80% 之间。又因为在实际控水处理中,植物在含水率70% ~80% 之间时已属于缺水状态,且影响植物正常生长,故而,以下针对玉米叶片含水率的检测精度和检测模型均在含水率在 70% ~80% 范围进行讨论。

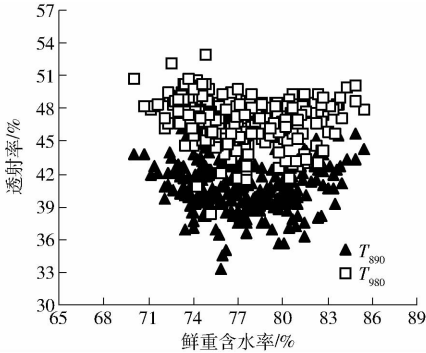


图 6 总体样本鲜重含水率与透射率散点图
Fig. 6 Scatter plot of fresh water content and transmittance of all samples

2.6 玉米叶片含水率检测

基于采集双路透射光,为了降低单一波段透射光谱易受叶片质地结构和叶片厚度干扰的影响,对两个波长数据进行植被指数计算,计算了比值植被指数(RVI)、差值植被指数(DVI)、归一化差异植被指数(NDVI)和调整型归一化植差异水分指数(MNDWI)等 6 个参数,计算公式如表 2 所示。

针对 70% ~80% 含水率范围内的玉米叶片样本分析。该范围内样本点总数为 199 个,含水率均

表 2 植被指数计算公式

Tab.2 Vegetation index calculation formula

参数	公式
比值植被指数	$RVI = \frac{X_{nir}}{X_{red}}$
差值植被指数	$DVI = X_{nir} - X_{red}$
归一化差异植被指数	$NDVI = \frac{X_{nir} - X_{red}}{X_{nir} + X_{red}}$
调整型归一化植差异水分指数	$MNDWI = \frac{X_{nir} - X_{red}}{X_{nir} + X_{red} - 0.5}$
差值比 890 nm 植被指数	$DVI_{890} = \frac{X_{nir} - X_{red}}{X_{red}}$
差值比 980 nm 植被指数	$DVI_{980} = \frac{X_{nir} - X_{red}}{X_{nir}}$

注: X_{nir} 是 980 nm 透射率, X_{red} 是 890 nm 透射率。

值为 75.9%,最大值为 80%,最小值为 70%。

首先讨论仪器采集数据对含水率的分辨率。干旱胁迫处理所得样本点之间含水率差异性不明显,故以千分位含水率为目标(‰),研究讨论对所采集叶片水分含水率数据进行聚类分析,分别按 0.1%、0.2%、0.3% 聚类。各植被指数与不同聚类精度下的含水率进行相关性分析,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,分别按 0.1%、0.2%、0.3% 聚类,总体而言, T_{890} 和 T_{980} 在不同聚类水平下均与含水率呈负相关,随聚类增加相关系数值增大,且相关系数绝对值均高于 0.60。当含水率聚类精度为 0.3% 时, T_{890} 和 T_{980} 相关系数达到 -0.91 和 -0.81,说明当含水率聚类精度为 0.3% 时仪器预测模型结果可以达到最佳。与 T_{890} 和 T_{980} 相比,构建的植被指数的相关性均较低,除了 MNDWI 相关系数较高之外,其他指数没有达到理想的结果,说明下一步需要构建新的植被指数提高预测精度。

表 3 植被指数与不同聚类精度下的含水率相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between vegetation index and moisture content under different clustering accuracies (r)

植被指数	T_{890}	T_{980}	MNDWI	DVI	RVI	NDVI	DVI_{890}	DVI_{980}
0.1% 聚类	-0.63	-0.60	0.29	0.10	-0.19	0.19	0.19	0.19
0.2% 聚类	-0.72	-0.67	0.51	0.18	-0.34	0.35	0.35	0.34
0.3% 聚类	-0.91	-0.81	0.45	-0.12	-0.13	0.13	0.14	0.13

精度为 0.3% 时的含水率与透射率 T_{890} 、 T_{980} 和 MNDWI 植被指数进行多元回归建模,分别随机均匀抽取建模集 21 个和验证集 10 个样本,所得模型公式为

$$y = 2.46 - 9.17T_{890} + 5.12T_{980} - 2.25MNDWI$$

(4)

建模集预测精度 $R_c^2 = 0.854$,验证集 $R_v^2 = 0.849$,RMSE 为 0.010 3,检测结果如图 7 所示。

3 结论

(1)基于朗伯比尔定律,设计了密闭夹持叶室结构,对(890 ± 10) nm 和(980 ± 10) nm 两路透射光信号进行采集、处理和发送,基于 ZigBee 无线传感网络与数据接收节点进行通信。通过对倒一叶、倒二叶鲜重含水率统计特性分析发现,倒二叶叶中部位与样本总体鲜重含水率最为接近,同时为避免

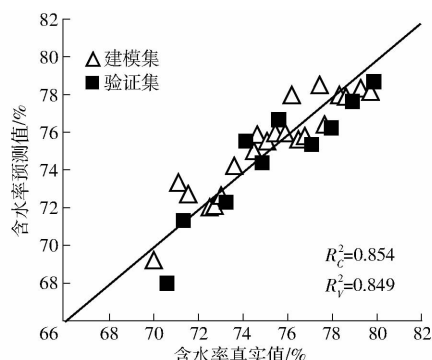


图7 含水率真实值与预测值散点图

Fig.7 Scatter plot of true value and predicted value of water content

叶片厚度导致光程影响,应用时推荐选用倒二叶中间部位进行检测。

(2)随着鲜重含水率增加, T_{980} 和 T_{890} 随含水率变化呈V型趋势,既在70%~80%含水率内透射率随含水率的增加呈现下降趋势,在含水率80%附近出现拐点,当80%以上时透射率随着含水率增加而增加,说明该仪器目前针对含水率70%~80%检测效果最佳。

(3)利用 T_{890} 、 T_{980} 和植被指数MNDWI建立玉米叶片含水率多元回归模型,建模集 $R_c^2 = 0.854$,验证集 $R_v^2 = 0.849$,RMSE为0.0103,可以满足大田应用的需求。

参 考 文 献

- 1 段萌,杨伟才,毛晓敏. 覆膜条件下水分亏缺对春小麦光合特性影响及光响应模型比较研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 219-227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.027.
- 2 DUAN Meng, YANG Weicai, MAO Xiaomin. Effects of water deficit on photosynthetic characteristics of spring wheat under plastic mulching and comparison of light response curve models[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 219-227. (in Chinese)
- 3 邱兆美,赵龙,毛鹏军,等. 不同缺水量对作物生理指标的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 260-263.
- 4 BITA C E, GERATS T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4(4): 273.
- 5 BOUGHALLEB F, ABDELLAOUI R, BRAHIM N B, et al. Growth, photosynthesis, water use efficiency, and osmoregulation of the wild species *Astragalus gombiformis*, Pomel. Under water deficit[J]. Brazilian Journal of Botany, 2016, 39(1): 147-156.
- 6 WANG X, VIGNJEVIC M, LIU F, et al. Drought priming at vegetative growth stages improves tolerance to drought and heat stresses occurring during grain filling in spring wheat[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 75(3): 677-687.
- 7 李昊,王忠义,王建旭,等. 鲜猪肉水分近红外光谱在线检测方法研究[J]. 现代科学仪器, 2014(4): 91-99.
- 8 朱丽伟,马文广,胡晋,等. 近红外光谱技术检测种子质量的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(2): 346-349.
- 9 ZHU Liwei, MA Wenguang, HU Jin, et al. Advances of NIR spectroscopy technology applied in seed quality detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(2): 346-349. (in Chinese)
- 10 WU X, WU B, SUN J, et al. Classification of apple varieties using near infrared reflectance spectroscopy and fuzzy discriminant c-means clustering model[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): e12355.
- 11 薛俊杰,韩鲁佳,杨增玲,等. 玉米秸秆饲料营养成分NIRS在线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 216-223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160730&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.030.
- 12 XUE Junjie, HAN Lujia, YANG Zengling, et al. On-line measurement of nutrient content of corn stover using NIRS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 216-223 (in Chinese)
- 13 HOLBEN B, SCHUTT J B, Mc MURTREY J. Leaf water stress detection utilizing thematic mapper bands 3, 4 and 5 in soybean plants[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 289-297.
- 14 INOUE Y, MORINAGA S, SHIBAYAMA M. Non-destructive estimation of water status on intact crop leaves based on spectral reflectance measurements[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1993, 62(3): 462-469.
- 15 严衍禄. 近红外光谱分析的原理、技术与应用[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2013.
- 16 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- 17 PEÑUELAS J, FILELLA I, BIEL C, et al. The reflectance at the 950~970 nm region as an indicator of plant water status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(10): 1887-1905.
- 18 王纪华,赵春江,郭晓维,等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(1): 104-107.
- 19 WNAG Jihua, ZHAO Chunjiang, GUO Xiaowei, et al. Study on the water status of the wheat leaves diagnosed by the spectral reflectance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(1): 104-107. (in Chinese)
- 20 周顺利,谢瑞芝,蒋海荣,等. 用反射率、透射率和吸收率分析玉米叶片水分含量时的峰值波长选择[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 28-31.
- 21 ZHOU Shunli, XIE Ruizhi, JIANG Hairong, et al. Selection of the wavelengths of peak values in analyzing leaf water status by using leaf reflectance, transmittance and absorptance in corn plants[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 28-31. (in Chinese)
- 22 刘洁,李小昱,李培武,等. 基于近红外光谱的板栗水分检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 338-341.
- 23 LIU Jie, LI Xiaoyu, LI Peiwu, et al. Determination of moisture in chestnuts using near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 338-341. (in Chinese)
- 24 GAO B C. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257-266.
- 25 PEÑUELAS J, INOUE Y. Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves[J]. Photosynthetica, 1999, 36(3): 355-360.
- 26 程晓娟,杨贵军,徐新刚,等. 新植被水分指数的冬小麦冠层水分遥感估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3391-3396.
- 27 CHENG Xiaojuan, YANG Guijun, XU Xin'gang, et al. Estimating canopy water content in wheat based on new vegetation water index[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3391-3396. (in Chinese)
- 28 白路军. 近红外水分检测仪研究[D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- 29 BAI Lujun. Research of near infrared moisture detector[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
- 30 韩书庆,于渤,孙明,等. 便携式叶绿素、氮素、水分一体化测定仪设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 256-259.
- 31 JIA J, JI H. Plant leaf water detection instrument based on near infrared spectroscopy [M] // Computer and Computing Technologies in Agriculture V. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 20-27.