

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.034

# 基于近红外反射的柑橘重叠叶片叶面积指数测量系统\*

吴伟斌<sup>1</sup> 冯灼峰<sup>2</sup> 洪添胜<sup>3</sup> 胡仁杰<sup>2</sup> 莫伟平<sup>2</sup> 霍庆<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 3. 国家柑橘产业技术体系机械研究室, 广州 510642)

**摘要:** 提出一种基于近红外反射的柑橘叶面积指数(LAI)测量方法。在平直近红外激光照射下,光电探测器接收重叠叶片的反射光能量,通过数据采集卡采集电压信号至上位机,利用 LabVIEW 软件编程,自动判断出重叠叶片层数。将叶片层数乘以直射光束的光斑面积即为该测试位置叶面积,而每次测试的叶面积累加即为该测试区域的总叶面积,最终求出 LAI。根据光谱反射试验结果选用近红外作为光源进行系统标定,得到重叠叶片层数与测量电压的指数拟合模型,  $S_{sig} < 0.05$  水平显著。试验结果表明,在手动扫描、定时采集方式下,以方格法计算的 LAI 作为真实值,系统对 LAI 的计算误差为 11.01%。

**关键词:** 柑橘 叶面积指数 近红外反射 重叠叶片 光电传感器

**中图分类号:** O657.33; Q-334 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0179-06

## Measurement System for Citrus LAI Based on Near-infrared Reflection

Wu Weibin<sup>1</sup> Feng Zhuofeng<sup>2</sup> Hong Tiansheng<sup>3</sup> Hu Renjie<sup>2</sup> Mo Weiping<sup>2</sup> Huo Qing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to construct a fast measurement system for leaf area index (LAI) based on near-infrared reflection, an innovative way was explored to accurately detect the LAI of overlapping leaves. Research methods were concluded as follows: overlapping leaves were put under the direct parallel light generated by the near-infrared laser, and the photoelectric sensors were used to measure the reflected light energy. The output voltage signal of the sensors was sent into the computer through the data acquisition card. The amount of overlapping layers was determined by software programming. The amount of overlapping layers was multiplied by the area of direct beam's light spot was the area of the leaves. The total area of the leaves was the cumulative leaf area in the whole testing process and LAI could be calculated. Based on the result of spectral reflection test, near-infrared was used as direct light source to demarcate the system to get the index fitting model between overlapping leaves' number and measuring voltage, which is notable in 0.05 statistic level. The result of data collection experiment shows that under the method in manual scanning and timing collection, the value of LAI was calculated by the system with 11.01% of the error compared with the true value of LAI calculated by square method.

**Key words:** Citrus Leaf area index Near-infrared reflection Overlapping leaves Photoelectric sensor

收稿日期: 2012-08-03 修回日期: 2012-09-25

\* 国家自然科学基金资助项目(30871450)、现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-27)、公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903023)、国家星火计划资助项目(2011GA780037)和广东省科技计划资助项目(2010A020507001-144)

作者简介: 吴伟斌,副教授,博士,主要从事信息技术与机电一体化应用研究,E-mail: wuweibin@scau.edu.cn

通讯作者: 洪添胜,教授,博士生导师,主要从事机电一体化和信息技术在农业中的应用研究,E-mail: tshong@scau.edu.cn

## 引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)为植物冠层表面物质、能量交换的描述提供结构化的定量信息。在农业应用中, LAI 测定对提高作物产量估测和病害评价有重要意义, 同时为作物变量喷施的研究提供技术依据<sup>[1-2]</sup>。近年来, 国外出现一系列间接测量 LAI 的方法, 如 Boschetti 利用美国 Licor 公司的 LAI-2000 检测, Mussche 利用 Hemispherical canopy photography 半球冠层摄像术测量, Kucharik 采用多波段植被图像仪(Multiband vegetation imager, MVI)测量及 Wells 采用 DEMON 测量冠层上下层的光密度, 然后用软件测量 LAI。研究方法一般采用光学模型和图像处理, 光学模型优点是比较简易方便, 缺点主要是未考虑相互重叠因素, 导致误差大; 图像处理优点是相对全面准确, 但是图像分割技术具有局限性及其图像处理速度低<sup>[3-5]</sup>。另外, 国内外在禾谷类大田作物上做的工作较多, 而在果树上工作尚少, 果树叶片与大田作物有许多不同<sup>[6-9]</sup>, 因此果树 LAI 研究很有必要。

与其他叶面积指数的检测方法相比, 光谱技术具有对被测对象无损而且检测快速等特点<sup>[10-15]</sup>。目前国内已有利用近红外光谱较好穿透叶片的特性, 分析重叠因素的影响, 推导单棵果树 LAI<sup>[16]</sup>, 然而利用近红外光谱的反射特性探究果树重叠 LAI 在国内研究较少报道<sup>[17-22]</sup>。本文构建一个基于近红外反射的重叠 LAI 测试系统, 目的在于探究在叶片重叠的状态下相对快速和准确地测量 LAI 的方法。该测试系统在平直近红外激光照射下, 通过光电探测器接收重叠叶片的反射光能量, 将电压信号显示并判断出重叠叶片层数, 进而计算 LAI。

## 1 系统整体设计

基于重叠柑橘叶片在特定波段的反射率与重叠的层数呈对数递增的规律, 采用近红外激光器作为直射光源, 通过光电探测器接收重叠叶片的反射光能量, 将数据采集卡采集的光电反射传感器输出的电压信号上传至上位机, 利用虚拟仪器 LabVIEW 平台开发软件完成对系统的构建。系统方案原理框图如图 1 所示。

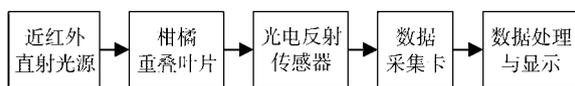


图 1 系统方案原理框图

Fig. 1 Block diagram of measurement system

其中, 激光器直射光源采用直流 5 V 供电、输出

波长为 808 nm, 激光器与光电探测器建立反射装置。测量对象为多层柑橘叶片, 叶片厚度大小较为均匀而且叶面较为平整。光电反射传感器部分: 选用 BPW34 型红外硅光电池(感光范围 400 ~ 1 100 nm, 中心波长 850 nm)作为光电探测器, 通过两级放大电路及适当滤波电路, 将重叠叶片的反射光强度转化为电压信号被采集卡采集。选用 NI 公司的 USB-4431 型高速数据采集卡: 提供数字触发, 4 个 24 位的模拟输入通道, 1 个 24 位的模拟输出通道, 采样频率 102.4 kS/s, 具有 100 dB 的动态范围。上位机安装有 LabVIEW 2010 软件和 NI-DAQ 驱动程序, 处理器主频 1.6 GHz, 内存 1 GB, 硬盘 160 GB。

## 2 光电反射传感器设计

### 2.1 高光谱成像仪测定重叠叶片的反射率特征

#### 2.1.1 高光谱成像仪

高光谱技术(Hyper spectral technology)是遥感技术中的一个重要部分。经高光谱技术获得的数据是不同波段下的光谱(可以分为吸收光谱和反射光谱)数据。高光谱成像仪主要由光源、光谱相机和样品移动台等部件组成。

在重叠柑橘叶片高光谱反射特征的测定试验中, 选用北京卓立汉光仪器有限公司(Zolix) HyperSIS-VNIR-QE 型高光谱成像仪(推扫型), 其测量的波长范围为 400 ~ 1 000 nm, 波长分辨率为 3 ~ 10 nm(依不同光谱段)。光谱数据分析软件为 Gilden-Photonics 公司的 Spectra SENS 软件。

#### 2.1.2 试验材料

在华南农业大学工程学院柑橘试验园东南、西北方向采样生长成熟的柑橘叶片, 以大小厚度均匀、叶面较为平整的叶片作为试验的采样标准。根据测定次序的需要, 把 8 片橘叶分别编号为叶片 1 ~ 叶片 8。

#### 2.1.3 重叠柑橘叶片高光谱反射特征的测定试验

启动成像仪供电电源和连接配套计算机, 在 Spectra SENS 光谱分析软件设置 CCD 成像镜头的图像读出模式(Binning)为 2 × 2, 曝光时间(Exposure)为 15 ms, 移动台(Scanner)的移动速度为 5 mm/s; 测定重叠叶片反射光谱前进行标准黑白背景标定。

试验步骤: ①在移动台上放置叶片 1, 点击软件 Waterfall 按钮进行拍照成像, 保存图像文件, 通过图片修正程序得到可以进行光谱分析的图像文件, 这样得到 1 层叶片的反射光谱图像, 一次测量过程需要 15 ~ 20 min。②保持叶片 1 的位置不变, 在其下面放置叶片 2, 保持叶片之间没有间距, 重复步骤①得到 2 层叶片的反射光谱图像。③重复步骤②, 依

次测试 3~8 片重叠叶片, 得到 8 个可光谱分析的图像文件。④用 Spectra SENS 软件依次打开 8 个图像文件, 并在叶片图像上选择一个矩形分析区域, 得到重叠叶片的高光谱数据曲线如图 2 所示。⑤双击高光谱数据曲线图, 可以把光谱反射数据导出为 Excel 文档。

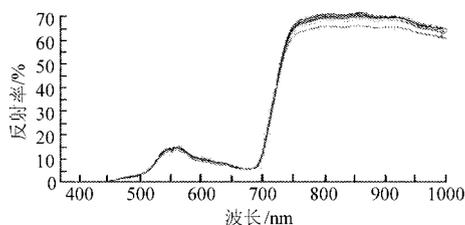


图 2 不同叶片重叠层数的高光谱数据曲线

Fig. 2 Spectral feature of overlapping leaves

### 2.1.4 反射光谱分析

由图 2 可以得出: 柑橘叶片光谱反射率随着叶片重叠层数的增加均有所增加, 在近红外区域尤为显著。在 750~1000 nm 波段内(短波近红外), 随着叶片层数的增多光谱反射率也随之增大, 而且反射率都在 60% 以上(60%~75%); 650~750 nm 波段内, 叶片反射率变化极大(由 5% 增大到 60%), 但 8 条曲线几乎重合, 分辨不出叶片层数; 480~650 nm 波段内反射率曲线出现了一个波峰, 但多条曲线之间的差异比较小, 不明显; 0~450 nm 波段反射率为 0%。

取波长 809.82 nm 的各次反射光谱数据进行分析, 在 SPSS 软件里建立反射率  $R$  与叶片层数  $N$  的散点图, 如图 3 所示。经过相关性分析得到  $R$  和  $N$  的对数回归模型

$$F = 66.165 + 2.541 \ln N \quad (1)$$

式中  $R^2 = 0.977$ , 回归模型的显著值  $S_{\text{sig}} = 0.000 \ll 0.05$ , 回归系数显著, 即反射率与叶片层数之间有对数关系。

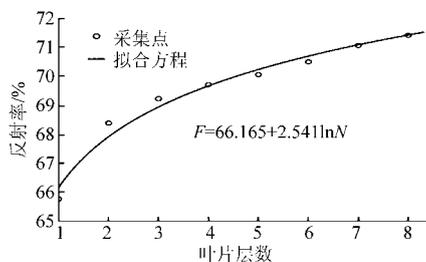


图 3 叶片反射率和叶片层数的对数拟合曲线

Fig. 3 Logarithmic curve fitting of overlapping leaves

## 2.2 光电反射传感器设计

### 2.2.1 直射光源的选择

根据 2.1 节分析, 选用直流 5 V 供电、输出波长为 808 nm、输出功率为 200 mW 的激光器作为直射光源, 激光照射到叶片, 一部分光能由光电探测器接

收转换为电压信号被数据采集卡接收。

### 2.2.2 光电探测器

如图 4 所示, 图中 1~8 为运算放大器 OP07 的输入输出引脚, INPUT 为放大电路的输入端, OUTPUT 为输出端, R1、R2、R4、R5 为可调电阻, R3 为固定电阻 50  $\Omega$ , 选用 BPW34 型红外硅光电池作为光电探测器, 其优点有: 响应快速、性能稳定、光谱范围宽、频率特性好、传递效率高、能耐高温辐射等。探测器贴在激光器的发射口边缘, 以接收尽可能多的反射光。

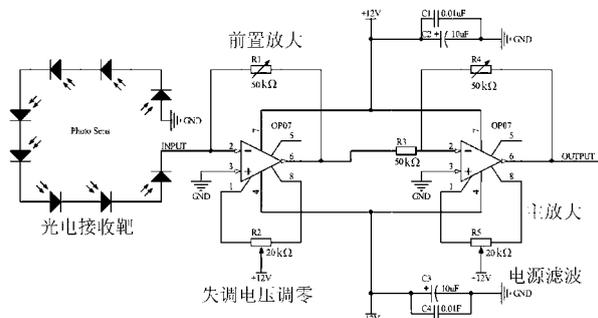


图 4 光电检测电路

Fig. 4 Circuit of optical measurement

### 2.2.3 前置放大电路

为了增大接收的范围, 电路利用多个硅光电池串联, 组成一个接收靶, 直接跨接在运算放大器的两端, 工作在零偏置即光伏模式, 实现精确的线性工作。硅光电池偏置由运算放大器的虚地维持在零电位上, 短路电流被转换成图 3 所示的叶片反射率。

### 2.2.4 主放大电路

主放大电路用来放大来自前置放大器输出的弱电压信号, 将前置放大器输出的信号放大到数据采集卡所需要的电平。当光电检测器输出的信号较大时, 通过自动增益控制电路对主放大器的增益进行调整, 以使主放大器的输出信号幅度在一定范围不受输入信号的影响。在实际电路中采用了 Texas Instruments 公司的 OP07 运算放大器。

### 2.2.5 直流电源滤波电路

在实际电路中, OP07 供电电源为  $\pm 12$  V, 为获得比较理想的直流电压, 需要利用具有储能作用的电抗性元件(如电容、电感)组成的滤波电路来滤除整流电路输出电压中的脉动成分以获得直流电压, 确保 OP07 芯片的正常工作。

### 2.2.6 输入失调电压调零电路

在室温及标准电源电压下, 为了使静态  $U_o = 0$ , 而在输入端需要加的补偿电压值称为输入失调电压  $U_{os}$ 。失调电压是集成运放一个很重要的技术指标, 为了提高控制精度, 往往要求集成运放在输入信号为零时, 输出亦为零, 即零位输出。然而, 由于线路

内部制作等客观条件的限制,这一点很难实现。为了确保零位输出,常用的方法是通过在器件的调零端外接电位器来实现。

### 2.2.7 反光杯

选用光亮铝灯杯,灯杯内部真空电镀处理,聚光反光效果较佳,能有效地降低光损,提高光效。其尺寸为:口径 78 mm,全高 42 mm,底部直径 22 mm。

## 3 系统软件设计

### 3.1 系统软件

本系统基于 LabVIEW 2010 平台结合 NI 公司的 USB-4431 型高速数据采集卡,主要完成对传感器电压信号的采集、处理、分析、数据保存及显示等。软件设计流程如图 5 所示。

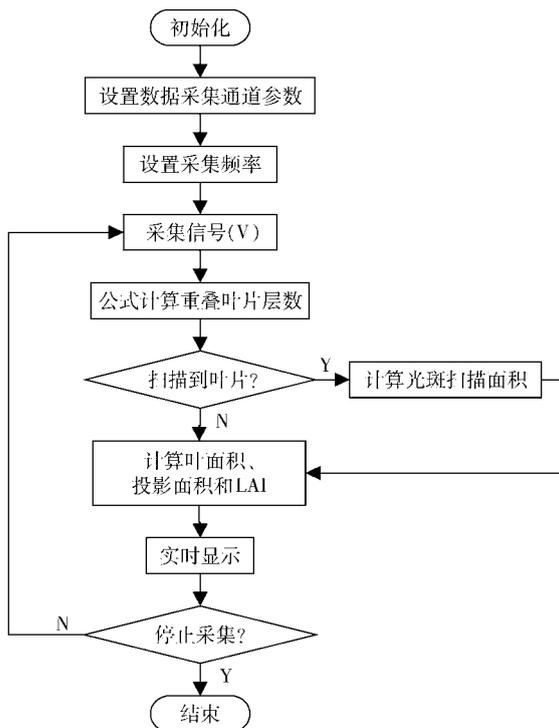


图 5 软件设计流程图

Fig. 5 System software flowchart based on LabVIEW

### 3.2 操作界面

图 6 为本测试系统的软件操作界面。操作界面划分为 3 个区域:参数设置区、相关测量数据显示区、波形和表格显示区。在参数设置区用户输入判断有无叶片电压时的电压,如输入 1.5 V,当采集电压大于 1.5 V 时系统判断为“扫描到有叶片”,此时系统将计算投影面积和叶面积等,否则判断为“扫描到无叶片”;用户还要输入扫描单位面积,即直射光源照射到叶片上的光斑大小。数据显示分为控件显示、表格显示和波形显示,控件显示瞬时值,表格实现测量数据存储,波形图可以看出叶面积和投影面积随时间的变化趋势。

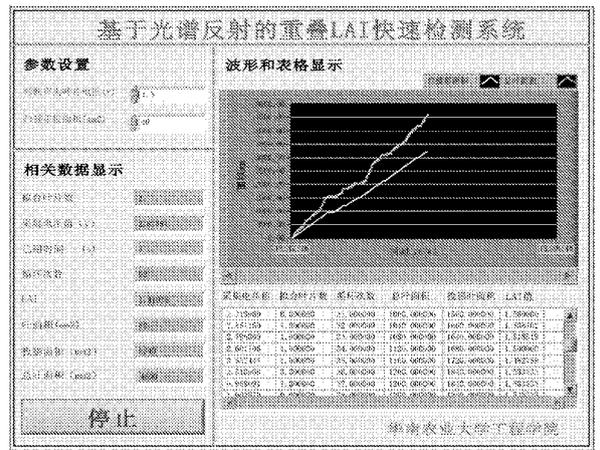


图 6 软件操作界面

Fig. 6 Operating interface of system

## 4 试验设计与数据分析

### 4.1 系统标定试验

试验材料:厚度较均匀、叶面平整光滑的叶片若干;自制光电反射传感器;5 V、±12 V 直流稳压电源;平面铁线网,大小为 20 cm × 30 cm;米尺。

标定试验步骤:①把叶片 1 平放在铁丝网上,光电传感器和被测叶片的距离定为 3 cm,同时保证激光器光束垂直照射在叶片上,测量 1 层叶片时的电压并记录。②考虑柑橘的实际生长情况,一般的柑橘果树在垂直的空间上重叠叶片层数不超过 6 片<sup>[22]</sup>,因此依次将 2~7 片叶子重叠,记录对应的测量电压值。③重复测量 3 次,得到标定试验数据如表 1 所示。

表 1 系统标定试验数据

Tab. 1 Data of calibration test

叶片 层数 $N$	采集电压/V			平均电压 $U/V$
	1	2	3	
1	2.903	2.918	2.925	2.915
2	3.201	3.339	3.269	3.27
3	3.354	3.518	3.511	3.461
4	3.498	3.551	3.55	3.533
5	3.491	3.585	3.565	3.547
6	3.522	3.492	3.604	3.539
7	3.539	3.642	3.624	3.602

在 SPSS 软件里建立重叠叶片层数  $N$  与测量电压平均值  $U$  的散点图,得到指数拟合曲线如图 7 所示。拟合方程为

$$N = 0.0003e^{2.703U} \quad (R^2 = 0.920) \quad (2)$$

回归模型的显著值  $S_{\text{sig}} = 0.001 < 0.05$ ,回归系数显著,即重叠叶片层数与测量电压值之间有指数关系。

### 4.2 LAI 实时测量试验和系统误差分析

#### 4.2.1 LAI 实时测量试验

试验条件:实时测量与系统标定的试验条件基

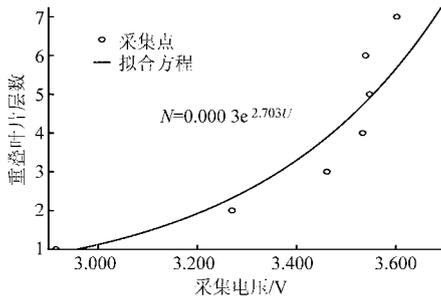


图 7 叶片层数与采集电压的指数拟合曲线

Fig. 7 Exponent curve fitting of leaf number and voltage

本上相同,传感器按 S 形路线对叶片所在区域进行扫描,手动进行。因为激光器投影在叶片上的光斑大小为  $5\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,所以扫描时横向移幅  $5\text{ mm}$ ,竖向移幅  $8\text{ mm}$ 。

试验步骤:

(1) 保持传感器到叶片的距离为  $3\text{ cm}$ ,激光器光束垂直照射。

(2) 将叶片随机平铺在铁丝网上,叶片层数从 1 到 4 变化。由重叠叶片层数与测量电压值之间有指数关系可知,叶片层数越多,电压变化越不明显,1~4 层叶片电压变化比较明显,超过 4 片叶片反射能量小,输出电压差别很小,反演的叶片层数不能被分辨,因此选择叶片层数从 1 到 4 的试验。

(3) 设置叶片判断有无叶片电压值为  $1.5\text{ V}$ ,扫描单位面积为  $40\text{ mm}^2$ 。

(4) 开始数据采集,按照 S 行路线对重叠叶片进行扫描,每  $1\text{ s}$  扫描一步,直到扫描完所有叶子的区域。

(5) 方格法计算叶面积和投影面积真实值:用透明方格纸( $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ )覆盖在待测叶片上,将叶片的轮廓描在方格纸上,统计叶片所占方格数,得到叶片的投影面积和叶面积。将测定的叶面积除以叶片投影面积,即为 LAI 的真实值。

LAI 实时测量数据如表 2 所示。

#### 4.2.2 系统误差分析

由表 2 可知,用于计算重叠叶片 LAI 的最大相对误差绝对值为  $20.35\%$ ,相对误差绝对值的平均值为  $11.01\%$ 。

产生误差的主要原因:①每片叶子的厚度和反射率有所不同,而假设每片叶子都近似一样,因此存在一定误差。②由于本数据采集试验是用手动方式

将铁丝网移动到每一个采集点进行数据采集,无法保证定位的精度。③每片叶子与反射光的角度都会存有差异,而假设是叶子垂直反射入射光。④叶片间距、传感器到叶片的距离和叶片的倾斜度等因素也会对本测量系统产生影响。

表 2 实时测量数据和误差分析

Tab. 2 Real-time measuring data and error analysis

测量序号	叶面积 /mm <sup>2</sup>	投影面 积/mm <sup>2</sup>	LAI 真实值	LAI 试验值	LAI 绝 对误差	LAI 相对 误差/%
1	71	44	1.61	1.42	-0.19	11.81
2	94	53	1.77	1.60	-0.18	10.04
3	92	53	1.74	1.51	-0.23	13.07
4	105	60	1.75	1.64	-0.11	6.46
5	105	52	2.02	1.85	-0.17	8.43
6	118	43	2.76	2.58	-0.18	6.52
7	121	46	2.65	2.25	-0.40	15.09
8	130	56	2.31	2.78	0.47	20.35
9	135	43	3.12	3.48	0.36	11.54
10	138	47	2.96	3.25	0.29	9.80
11	124	43	2.89	2.71	-0.18	6.23
12	145	47	3.08	3.24	0.16	5.19
13	137	53	2.59	2.86	0.27	10.42
14	150	45	3.35	3.95	0.60	17.91
15	142	44	3.24	3.64	0.40	12.35
					0.28	11.01

## 5 结论

(1) 通过对重叠叶片进行光谱反射特征分析,探索出柑橘叶子在重叠的状态下,反射率随着叶片重叠层数的增加而呈对数递增的规律,在短波近红外波段明显。

(2) 设计了近红外光电反射传感器,并进行系统标定,得出重叠叶片层数与测量电压值之间指数关系显著。

(3) 利用 LabVIEW 和数据采集卡实现基于光谱反射的重叠 LAI 测试系统的构建,数据采集试验结果表明,在手动扫描、定位采集方式下,系统计算结果相对误差绝对值平均为  $11.01\%$ 。

(4) 柑橘叶片的反射率与叶片重叠的层数有明显的相关关系,研制出专门的传感器用来构建重叠叶片 LAI 的测量系统,可以为作物变量喷施的研究提供技术依据。

## 参 考 文 献

- 王希群,马履一,贾忠奎,等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537~541.  
Wang Xiqun, Ma Lüyi, Jia Zhongkui, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI)[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 537~541. (in Chinese)
- 吴伟斌,洪添胜,王锡平,等. 叶面积指数地面测量方法的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(2): 270~275.  
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Wang Xiping, et al. Advance in ground-based LAI measurement methods[J]. Journal of Huazhong

- Agricultural University, 2007, 26(2): 270 ~ 275. (in Chinese)
- 3 Bonhomme R, Grancher C V, Chartier P. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops [J]. *Photosynthesis*, 1974, 8(3): 299 ~ 301.
  - 4 Kucharik C J, Norman J M, Gower S T. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect asurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 11(9): 69 ~ 88.
  - 5 刘燕德, 万常澜. 芝麻油掺伪的近红外透射光谱检测技术 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 137 ~ 140.  
Liu Yande, Wan Changlan. Analysis of sesame oil adulteration using near infrared transmission spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 137 ~ 140. (in Chinese)
  - 6 刘镛源, 王纪华, 杨贵军, 等. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 220 ~ 224.  
Liu Rongyuan, Wang Jihua, Yang Guijun, et al. Comparison of ground-based LAI measuring methods [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 220 ~ 224. (in Chinese)
  - 7 吴伟斌, 洪添胜, 张立俊, 等. 柑橘叶面积指数自动测量红外透射系统的开发与应用 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 155 ~ 162.  
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Zhang Lijun, et al. Development and application of citrus LAI using infrared transmittance technique [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 155 ~ 162. (in Chinese)
  - 8 姚克敏, 胡凝, 吕川根, 等. 鱼眼影像技术反演植被冠层结构参数的研究进展 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(1): 139 ~ 144.  
Yao Kemin, Hu Ning, Lu Chuangen, et al. Advances in canopy structure parameters retrieval using hemispherical photography [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, 31(1): 139 ~ 144. (in Chinese)
  - 9 马泽清, 刘琪璟, 曾慧卿, 等. 南方人工林叶面积指数的摄影测量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 1971 ~ 1980.  
Ma Zeqing, Liu Qijing, Zeng Huiqing, et al. Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 1971 ~ 1980.
  - 10 海全胜, 吴琼, 包刚. 草地高光谱植被指数与叶面积指数的关系研究 [J]. *阴山学刊: 自然科学版*, 2011, 25(4): 52 ~ 55.  
Hai Quansheng, Wu Qiong, Bao Gang. Research and analysis of the correlation between hyperspectral vegetation index and leaf area index of grassland [J]. *Yinshan Academic Journal: Natural Science Edition*, 2011, 25(4): 52 ~ 55. (in Chinese)
  - 11 李万春, 田燕, 王鹏云. 基于常规扫描仪的植物叶面积计算系统 [J]. *气象业务现代化*, 2004, 30(8): 39 ~ 41.  
Li Wanchun, Tian Yan, Wang Pengyun. Investigation of plant leaf area calculation system with general scanner [J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(8): 39 ~ 41. (in Chinese)
  - 12 张继祥, 魏钦平, 张静, 等. 利用冠层分析仪测算苹果园叶面积指数及其可靠性分析 [J]. *园艺学报*, 2010, 37(2): 185 ~ 192.  
Zhang Jixiang, Wei Qinping, Zhang Jing, et al. Leaf area index estimated with plant canopy analyzer in apple orchards and analysis of its reliability [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(2): 185 ~ 192. (in Chinese)
  - 13 陆秀明, 黄庆, 孙雪晨, 等. 图像处理技术估测水稻叶面积指数的研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 65 ~ 68.  
Lu Xiuming, Huang Qing, Sun Xuechen, et al. Application of image processing technology in rice canopy leaf area index [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 65 ~ 68. (in Chinese)
  - 14 刘关君, 王大海, 郭晓瑞, 等. 植物叶面积的快速精确测定方法 [J]. *东北林业大学学报*, 2004, 32(5): 82 ~ 83.  
Liu Guanjun, Wang Dahai, Guo Xiaorui, et al. A rapid and accurate method for determining leaf area [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(5): 82 ~ 83. (in Chinese)
  - 15 吴伟斌, 洪添胜, 李震, 等. 基于光谱信息的柑橘树叶面积指数测试系统研制 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊1): 124 ~ 128.  
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Development of measurement system for citrus LAI based on spectrum information [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(Supp. 1): 124 ~ 128. (in Chinese)
  - 16 任海, 彭少麟, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究 [J]. *生态学报*, 1996, 16(2): 174 ~ 179.  
Ren Hai, Peng Shaolin, Zhang Zhuping, et al. Study on canopy structure and canopy radiation of monsoon evergreen broad leaf forest in Dinghushan biosphere reserve, Guangdong [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(2): 174 ~ 179. (in Chinese)
  - 17 姚云军, 秦其明, 张自力, 等. 高光谱技术在农业遥感中的应用研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 301 ~ 306.  
Yao Yunjun, Qin Qiming, Zhang Zili, et al. Research progress of hyperspectral technology applied in agricultural remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 301 ~ 306. (in Chinese)
  - 18 李迅. 叶面积指数测定方法综述 [J]. *现代园艺*, 2011(7): 8 ~ 9.  
Li Xun. Leaf area index determination methods were reviewed [J]. *Xiandai Horticulture*, 2011(7): 8 ~ 9.
  - 19 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶干重和叶面积指数监测 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 34 ~ 44.  
Feng Wei, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Monitoring leaf dry weight and leaf area index in wheat with hyperspectral remote sensing [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 34 ~ 44. (in Chinese)
  - 20 梁亮, 杨敏华, 臧卓, 等. 利用可见/近红外光谱测定小麦叶面积指数的改进研究 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(11): 1205 ~ 1210.  
Liang Liang, Yang Minhua, Zang Zhuo, et al. Improvement research of wheat leaf area index measurement using visible/near-infrared spectra [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1205 ~ 1210. (in Chinese)
  - 21 黄春燕, 刘胜利, 王登伟, 等. 大豆叶面积指数的高光谱估算模型研究 [J]. *大豆科学*, 2008, 27(2): 228 ~ 233.  
Huang Chunyan, Liu Shengli, Wang Dengwei, et al. Models for estimating soybean leaf area index using hyperspectral data [J]. *Soybean Science*, 2008, 27(2): 228 ~ 233. (in Chinese)
  - 22 吴伟斌, 洪添胜, 朱余清, 等. 基于虚拟仪器的果树重叠叶片 LAI 实时检测系统 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 169 ~ 173.  
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Zhu Yuqing, et al. Real-time detection system for LAI of fruiter overlapped leaves-based on virtual instruments [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4): 169 ~ 173. (in Chinese)