

柑橘树冠层叶密度高光谱信息反演试验分析

吴伟斌^{1,2} 余耀烽² 洪添胜^{1,2} 周学成²
邓小玲² 游展辉² 张成² 李佳雨²

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/
国家柑橘产业技术体系机械研究室/广东省山地果园机械创新工程技术研究中心, 广州 510642;
2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642

摘要 以地物谱仪作为核心的数据采集平台采集光谱数据后通过计算机进行处理拟合, 利用光谱分析软件 ViewSpecPro, 辅助以 Excel、SPSS 等数据统计软件进行光谱数据反演, 探究柑橘树冠层光谱的 4 种形式与叶面积指数(leaf area index, LAI)的相关性, 从而利用相关性最高的光谱参数对 LAI 进行定量化模拟估算和实时采集。结果表明, LAI 与光谱信息系数 NDVI、 ρ_{550} 的反射能量、 ρ_{850} 的反射能量、一阶导数、红边幅值、红边面积等的拟合方程相关系数(R)分别为 0.886、0.906、0.871、0.912、0.798、0.870, 相应方程的显著水平 $P < 0.05$ 。NDVI、红边幅值和红边面积与 LAI 都达到较高的相关水平, 可以对柑橘树冠层 LAI 进行模拟估算。

关键词 柑橘树; 冠层叶密度; 叶面积指数; 高光谱; 反演; 地物谱仪

中图分类号 S 237; TP 274.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)01-0047-08

叶密度主要由叶面积指数(leaf area index, LAI)和叶面积密度(leaf area density, LAD)组成。叶密度在生态系统分析、植被生产力及植被遥感等方面有着重要作用^[1-4]。叶密度对于果树的生长发育监控、果品控制、病虫害防控至关重要。因此, 在果树上开展叶密度研究越来越受到重视。柑橘是我国重要的果树, 栽培面积和产量均居世界首位。开展柑橘树冠层叶密度无损检测方法的研究, 对于提高果实品质、估产测产、精准药物喷施和促进果树产业健康发展、增加果农收入具有重要意义。LAI 的检测方法较多, 但是受到不同种类植物冠层形态不一、仪器误差、单一仪器针对树种类别少等原因影响, 研究者们至今没找到一种简单普适的 LAI 获取方法。目前, 高光谱遥感以其独特的高分辨率、信息丰富等特点, 使其在 LAI 监测中有着广阔的应用前景^[5-7]。杨峰等^[8]通过高光谱遥感技术来估算水稻和小麦的叶面积指数。夏天等^[9]通过 ASD 地物谱仪和 SunScan 冠层分析系统监测冬小麦的冠层光

谱及叶面积指数, 得出高光谱植被指数与叶面积指数之间的关系。侯学会等^[10]通过光谱一阶微分技术和光谱响应函数, 建立等效 MODIS 植被指数和高光谱遥感估算模型。唐建民等^[11]通过 CASI 高光谱数据, 获取不同作物的光谱反射率, 提出作物 LAI 的遥感估算模型。然而, 针对地面果树冠层 LAI 光谱反演方面研究少见报道。本研究通过田间实验, 采用地物谱仪在自然环境下测得柑橘树生长的各种物候关键期的植株冠层光谱和柑橘投影面积来测量 LAI, 根据柑橘树冠层光谱特有的吸收、反射和红边特征, 确定对柑橘树叶面积指数可能有影响的光谱波段, 探究柑橘树光谱的 4 种形式与 LAI 的相关性, 为建立地面果树叶面积指数的定量化估算模型提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 系统方案原理

1) 柑橘树 LAI 的快速估算。通过 SPSS 与 Ex-

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(30871450); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27); 广东省自然科学基金项目(2015A030313426)

吴伟斌, 博士, 教授, 研究方向: 农业工程、机电一体化和信息技术应用, E-mail: wuweibin@scau.edu.cn

通信作者: 洪添胜, 博士, 教授, 研究方向: 农业工程、机电一体化和信息技术应用, E-mail: tshong@scau.edu.cn

cel 对植株的光谱数据以及叶面积指数进行拟合分析;通过分析探索光谱数据以及叶面积指数的关系,进而快速估算柑橘树的 LAI。

2)第 1 组 LAI 测算。利用扫描仪收集叶片的图像数据,把收集的叶片图像经过 Matlab 处理,从而得到总叶面积。只要将植物的占地面积与总叶面积对比,可以得到第 1 组 LAI^[12]。

3)第 2 组 LAI 测算。第 2 组 LAI 可通过柑橘树投影面积图获得。首先,利用铅锤与图纸手工求出柑橘树投影图,通过 Matlab 处理投影图得到投影面积。将投影面积与植物的占地面积对比,可以得到第 2 组 LAI。

4)光谱信息处理。分别在柑橘树上 3 个不同的点,利用地物谱仪多次采集光谱数据,最后采集的光谱数据通过光谱分析软件进行处理。

5)柑橘树总面积估算。每棵树采集 24 片叶片并且对每片叶片进行扫描,利用 Matlab 求出叶片的平均面积。再利用叶子的平均面积乘以每棵树的总叶片数,得出每棵树的总叶面积。

6)数据拟合。将上述数据汇总拟合,利用数据分析软件将上述数据分析拟合,得出不同组别数据之间的关系。

基于光谱数据的柑橘叶密度分析系统包括 2 个部分:以 FieldSpec-FR 地物谱仪为核心的光谱信息采集平台和以计算机、扫描仪为一体的数据分析平台。

1.2 高光谱信息的采集

1)系统调试。调试光谱采集系统,将计算机与 FieldSpec-FR 地物谱仪连接。

2)数据测量。白板校正,将地物谱仪对准白板,探头要求垂直对准白板,白板要充满视场。在 RS3 数据采集分析软件包里按 OPT 进行优化,如果光度足够强,可以看到图像在 y 轴一处呈一条直线,表示实验环境光强足够,可以开始实验测试。如果在光度不够或者有云的情况下,图形就会是曲线,或者是看到某些地方有干扰,则需重新校对。开始测试时,观测 RS3 软件里的图像,让图形稳定后,按下空白键储存。在同一个点测出 3 组光谱信息。然后移到不同的点按上述方法测量,每棵树测 3 个点共 9 组数据。

3)数据处理。保存好光谱信息,然后采用 ViewSpecPro 软件对光谱信息进行提取,最后转化

为 txt 文件导入 Excel,使数据容易处理。

1.3 柑橘树叶面积指数标定试验

1)试验原理。主要是通过手工描画柑橘树投影,然后通过相关软件(Photoshop、Matlab)对投影进行处理得到柑橘树投影轮廓面积。柑橘树叶面积指数标定实验的坐标图象采用 A4 纸的大小,计算公式为:

$$S_{\text{标}} = (210 \times 297) / 970970 = 0.064\ 234\ 7\ \text{mm}^2$$

2)柑橘树轮廓面积的计算。将白纸剪开一段放到果树下面,每次都要确保整棵树的轮廓都落在白纸内,而且纸面要保持干净、画线要清晰,否则会影响实验的结果。在白纸的空白处放 1 张 A4 纸,用数码相机拍照,上传到计算机并采用 jpg 格式保存。使用 Photoshop 圈出果树的轮廓,再将果树轮廓线面积部分变成黑色背景,保存图像。利用 Matlab 软件计算轮廓面积,利用 A4 纸的面积作为参照以便算出结果。

```
PIC_GATE=0.4;%源图像的阈值;
MOD_A=0.0001;%修正图像的实际面积;
PIC=imread(F:\area\source\源图片.jpg);
PIC_G=rgb2gray(PIC);
PIC_T=im2bw(PIC_G,PIC_GATE);
imwrite(PIC_T,F:\area\sink\源图片二值图.jpg);
imshow(PIC_T);
PIC_T=(~PIC_T);
PIC_AREA=bwarea(PIC_T);
MOD=imread(F:\area\source\源修正.jpg);
MOD_G=rgb2gray(MOD);
MOD_T=im2bw(MOD_G,0.04);
imwrite(MOD_T,F:\area\sink\源修正二值图.jpg);
MOD_T=(~MOD_T);
MOD_AREA=bwarea(MOD_T);
AREA=(PIC_AREA/MOD_AREA)*MOD_A
```

通过上述完整的程序运行之后,可以得出轮廓面积,如表 1 所示。

总叶面积 S_N 可通过代表叶片法求得。代表叶片法是选取每颗树的东、南、西、北 4 个方向,分别在各个方向的上、中、下 3 层各选取 3 片采样叶片,求出采样叶片的平均叶面积 S_d ,然后乘以每棵树的总叶片数得到总叶片面积 $S_{N[13]}$,最后根据公式 $L = S_N/S_d$ 求得真实值 LAI。

1.4 光谱参数及其提取方法

1)光谱植被指数。植被指数能够分析和表达植

表 1 果树轮廓面积数据

Table 1 The contour area data of fruit trees

编号 Number	轮廓面积/mm ² Contour area	编号 Number	轮廓面积/mm ² Contour area
1	0.100 3	23	0.311 1
2	0.411 6	24	0.645 3
3	0.200 4	25	0.620 0
4	0.339 3	26	0.275 6
5	0.569 6	27	0.380 2
6	0.216 9	28	0.267 4
7	0.080 3	29	0.580 1
8	0.559 9	30	0.423 1
9	0.371 3	31	0.520 9
10	0.414 3	32	0.247 0
11	0.376 0	33	0.492 2
12	0.461 7	34	0.269 8
13	0.352 1	35	0.520 6
14	0.419 8	36	0.410 4
15	0.267 5	37	0.472 4
16	0.471 4	38	0.557 3
17	0.618 2	41	0.186 2
18	0.460 4	42	0.406 8
19	0.636 9	43	0.345 5
20	0.237 8	44	0.413 3
21	0.705 5	45	0.374 0

物的生长状态和生物、化学和物理参数的重要指标。一般而言,植被指数的变化与植物生长状况的变化量不具有连续性。由于光谱的近连续性,一般常用的光谱植被指数不适合用于柑橘树的光谱测试中,因此,应按照光谱方法来构建新的光谱植被指数(包括归一化植被指数 NDVI、比值植被指数 RVI)^[14-18]。选取归一化植被指数 NDVI、比值植被指数 RVI 的原因是这 2 个指数能够较好地反映柑橘树的覆盖度,监测柑橘树的生产状况。

$$N_{DVI} = \frac{R(\lambda + \Delta\lambda) - R(\lambda - \Delta\lambda)}{R(\lambda + \Delta\lambda) + R(\lambda - \Delta\lambda)} = \left[\frac{1}{2R(\lambda)} \cdot \frac{dR}{d\lambda} \right] \quad (1)$$

$$R_{VI} = \frac{R(\lambda - \Delta\lambda)}{R(\lambda + \Delta\lambda)} = \left[1 - \frac{1}{2R(\lambda)} \cdot \frac{dR}{d\lambda} \right] \quad (2)$$

2) 光谱数据微分变换。光谱的微分技术是常用的光谱处理方法。采用光谱微分技术主要有两方面原因:首先,光谱微分可以有效地去除对目标光谱有影响的背景噪音因素(大气辐射、散射、投射率等);其次,光谱微分能加强光谱曲线在坡度上的变化从

而提高重叠光谱的区分度^[19]。光谱数据的微分变换的结果一般是求导数光谱,由于光谱数据是离散形式的,其微分的计算就成为了计算差分,公式如下:

$$\rho'(\lambda_i) = \frac{\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda} = \frac{d\rho(\lambda_i)}{d\lambda} \quad (3)$$

其中, λ_i 是波段*i*的波长值, $\rho(\lambda_i)$ 是波长 λ_i 的光谱值, $\Delta\lambda_i$ 是波长 λ_{i+1} 到 λ_i 的差值,由光谱采样间隔决定。

3)“红边”参数。红边的定义为绿色植物在红光范围(680~750 nm)内反射光谱的一阶导数的最大值所对应的光谱位置。在描述红边特征的参数中,一般有红边位置、红边幅值*D*和红边面积*S*。研究表明,通过红边特性,可以减轻甚至去除混合背景(土壤、岩石或水等)对光谱分析的影响^[20-22]。“红边”参数可用如下公式计算^[17]:

$$D\lambda_r = \max [R'(\lambda)_{\lambda=680\sim750\text{ nm}}] \quad (4)$$

$$S_r = \int_{680}^{750} R'(\lambda) d\lambda = \int_{680}^{750} dR(\lambda) = R_{750} - R_{680} \quad (5)$$

2 结果与分析

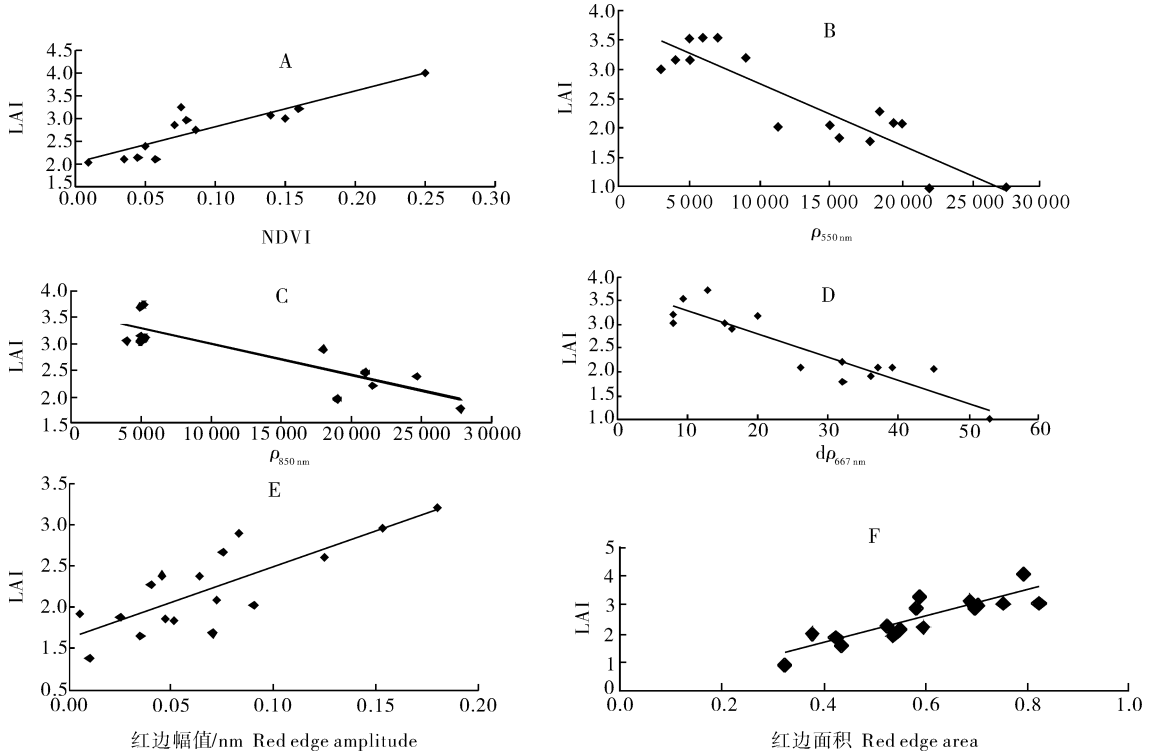
2.1 柑橘树光谱与叶面积指数的相关性分析

1)使用 Excel 进行拟合分析。在柑橘树光谱与叶面积指数的相关性分析中,选取了归一化植被指数 NDVI、波段 550 nm 的反射能量、波段 850 nm 的反射能量、677 nm 波段一阶导数光谱值、红边幅值和红边面积,进行一元线性回归,可以得到这 6 组数据之间的统计关系。

2)SPSS 拟合分析。LAI 与 NDVI 拟合曲线如图 1A 所示。经过 SPSS 分析,LAI 与 NDVI 的回归方程为 $Y = 7.8503X + 2.0405$,且 LAI 与 NDVI 的相关系数值 *R* 为 0.886,相关性显著。LAI 与波段 550 nm 的反射能量拟合曲线如图 1B 所示。经过 SPSS 分析,LAI 与 ρ_{550} 的反射能量的回归方程为 $Y = -0.0001X + 3.7656$,且 LAI 与 ρ_{550} 的反射能量的相关性系数 *R* 为 0.906,相关性显著。LAI 与波段 850 nm 的反射能量拟合曲线如图 1C 所示。经过 SPSS 分析,LAI 与 ρ_{850} 的反射能量的回归方程为 $Y = -0.00006X + 3.601$,且 LAI 与 ρ_{850} 的反射能量的相关性系数 *R* 为 0.871,相关性显著。LAI 与 677 nm 波段一阶导数光谱值拟合曲线如图 D 所示。经过 SPSS 分析,LAI 与一阶导数光谱值的回归方程为 $Y = -0.0492X + 3.7894$,且 LAI 与一阶导数光

谱值的相关性系数 R 为 0.912, 相关性显著。LAI 与红边幅值拟合曲线如图 E 所示。经过 SPSS 分析, LAI 与红边幅值的回归方程为 $Y = 8.7X + 1.6225$, 且 LAI 与红边幅值的相关性系数 R 为

0.798, 相关性显著。LAI 与红边面积, 拟合曲线如图 F 所示。经过 SPSS 分析, LAI 与红边面积的回归方程为 $Y = 4.4889X - 0.1023$, 且 LAI 与红边面积的相关性系数 R 为 0.870, 相关性显著。



A: LAI 与 NDVI 拟合曲线 Fitting curve between LAI and NDVI; B: LAI 与波段 550 nm 拟合曲线 Fitting curve between LAI and band 550 nm; C: LAI 与波段 850 nm 拟合曲线 Fitting curve between LAI and band 850 nm; D: LAI 与 677 nm 波段一阶导数光谱值拟合曲线 Fitting curve between LAI and the value of band 677 nm first derivative spectrum; E: LAI 与红边幅值拟合曲线 Fitting curve between LAI and the amplitude of the red edge; F: LAI 与红边面积拟合曲线 Fitting curve between LAI and area of red edge.

图 1 LAI 与 NDVI、 ρ_{550} 的反射能量、 ρ_{850} 的反射能量、一阶导数、红边幅值、红边面积等的拟合曲线

Fig.1 Fitting curve between LAI and NDVI, band 550 nm, 850 nm, band 677 nm first derivative spectrum, amplitude of the red edge and area of red edge

2.2 误差分析

为了提高光谱数据与 LAI 之间拟合方程的准确度, 消除各种自然和人为因素对光谱图像数据的影响, 需要对采集的光谱数据进行误差分析。通过 LAI 与 NDVI 的回归方程得到的 LAI, 将其与实测 LAI 值进行误差分析, 误差分析如表 2 所示。由误差分析可知, LAI 与 NDVI 拟合方程用于实践中产生的误差是 1.79%, 产生的误差比较小, 所以可认为在允许一定误差的自然条件下, 该拟合方程能够实现由光谱反演估测 LAI。

LAI 与 ρ_{550} 的反射能量的拟合方程的误差分析如表 3 所示。经过误差分析, 得出 LAI 与 ρ_{550} 的反射能量的拟合方程所求的 LAI 与实测的 LAI 的误差为 3.79%。

LAI 与一阶导数拟合方程的误差分析如表 4 所示。经过误差分析, 得出 LAI 与一阶导数的拟合方程所求的 LAI 与实测的 LAI 的误差为 3.06%。

LAI 与红边面积拟合方程的误差分析, 如表 5 所示。经过误差分析, 得出 LAI 与红边面积的拟合方程所求的 LAI 与实测的 LAI 的误差为 3.25%。

表 2 LAI 与 NDVI 拟合方程的误差分析

Table 2 The analysis of LAI and NDVI fitted equations error

LAI 实测值 Measured value of LAI	LAI 预测值 Predictive value of LAI	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error
2.124 7	1.926 5	0.198 2	9.328
2.065 7	2.426 6	-0.361 0	-17.470
2.008 7	2.359 1	-0.350 0	-17.440
2.340 0	2.503 6	-0.157 0	-6.710
2.000 0	1.836 7	0.435 5	19.168
2.272 2	3.188 1	-0.211 0	-7.080
2.977 0	3.800 0	0.195 8	4.849
4.037 3	15.000 0	-0.494 0	-24.320
2.031 0	2.249 0	-0.297 0	-15.560
1.909 4	2.206 5	-0.198 0	-6.250
3.169 4	3.367 5	0.203 6	7.275
2.799 4	2.595 7	0.235 6	8.263
2.850 6	2.615 1	-0.090 0	-3.020
2.962 6	3.052 1	0.008 8	0.324
2.134 0	2.704 6	-0.165 0	-18.600
0.885 7	1.050 5	0.326 9	11.049
2.958 7	2.631 8	0.098 8	4.581
2.156 2	2.057 4	0.624 9	19.321
误差绝对值的平均值 Mean		0.000 3	1.790

表 3 LAI 与 ρ_{550} 的反射能量的拟合方程的误差分析

Table 3 The error analysis of LAI and ρ_{550} fitted equations

LAI 实测值 Measured value of LAI	LAI 预测值 Predictive value of LAI	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error
2.065 7	2.060 0	-0.440 0	-21.320
2.008 7	1.556 4	0.452 3	22.519
2.211 1	1.783 3	0.427 8	19.349
2.977 3	3.350 4	-0.373 0	-12.530
1.831 8	2.177 4	-0.346 0	-18.870
0.889 2	1.528 7	-0.639 0	-71.910
2.031 0	1.618 4	0.412 6	20.315
2.045 1	2.194 4	-0.149 0	-7.300
3.169 4	2.620 4	0.549 0	17.321
2.962 6	3.212 6	-0.250 0	-8.440
0.885 7	0.974 2	-0.088 0	-9.980
2.903 0	3.142 2	-0.239 0	-8.240
3.018 0	3.121 5	-0.103 0	-3.430
3.481 5	3.160 2	0.321 4	9.230
1.615 8	1.865 7	-0.250 0	-1.546
3.234 5	3.208 7	0.025 8	0.797
3.476 8	3.221 6	0.255 2	7.339
3.538 4	3.101 6	0.436 8	12.343
误差绝对值的平均值 Mean		0.000 1	3.790

表 4 LAI 与一阶导数拟合方程的误差分析

Table 4 The error analysis of LAI and first order derivative fitting equation

LAI 实测值 Measured value of LAI	LAI 预测值 Predictive value of LAI	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error
2.124 7	2.442 7	-0.318 0	-14.960
2.008 7	1.845 6	0.163 1	8.118
2.211 1	2.109 5	0.101 6	4.596
1.831 8	2.009 3	-0.177 0	-9.690
0.889 2	1.005 2	-0.116 0	-13.050
2.031 0	1.565 7	0.465 3	22.909
2.045 1	1.916 3	0.128 8	6.297
3.169 4	2.747 0	0.422 4	13.326
2.962 6	3.352 1	-0.390 0	-13.150
2.713 4	2.367 4	0.345 9	12.749
0.885 7	1.252 6	-0.367 0	-41.410
2.903 0	3.174 4	-0.271 0	-9.350
3.018 0	3.206 8	-0.189 0	-0.063
3.481 5	3.306 9	0.174 7	5.017
1.615 8	2.100 9	-0.485 0	-30.020
3.234 5	3.361 6	-0.127 0	-3.930
3.476 8	3.304 4	0.172 4	4.958
3.538 4	3.227 7	0.310 6	8.779
误差绝对值的平均值 Mean		0.008 6	3.060

表 5 LAI 与红边面积拟合方程的误差分析

Table 5 The error analysis of LAI and the area of red edge fitted equations

LAI 实测值 Measured value of LAI	LAI 预测值 Predictive value of LAI	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error
2.065 7	2.662 1	-0.596 4	-28.870
2.364 2	2.120 9	0.225 2	9.599
2.211 1	1.977 3	0.233 8	10.573
2.977 3	3.084 9	-0.107 7	-3.620
1.831 8	2.314 2	-0.482 4	-26.330
2.031 0	2.582 7	-0.551 7	-27.170
2.045 1	1.767 3	0.277 8	13.584
2.850 6	2.659 4	0.191 2	6.707
2.962 6	3.009 6	-0.047 0	-1.590
2.713 4	2.559 9	0.153 4	5.655
2.903 0	3.154 5	-0.251 5	-8.660
3.018 0	3.174 9	-0.156 9	-5.200
3.481 5	2.994 6	0.487 0	13.987
1.615 8	2.396 4	-0.780 6	-48.310
2.958 7	2.626 3	0.332 4	11.235
3.234 5	3.112 7	0.121 8	3.765
3.476 8	3.182 1	0.294 7	8.477
3.538 4	3.265 6	0.272 8	7.709
误差绝对值的平均值 Mean		0.021 3	3.250

3 讨 论

本研究探究柑橘树光谱的 4 种形式与果树冠层 LAI 的相关性, 从而利用相关性最高的光谱参数对 LAI 进行定量化模拟估算和实时采集。试验结果表明, LAI 与光谱信息系数 NDVI、 ρ_{550} 的反射能量、 ρ_{850} 的反射能量、一阶导数、红边幅值、红边面积等的拟合方程相关系数 R 分别为 0.886、0.906、0.871、0.912、0.798、0.870, 相应方程的显著水平 $P < 0.05$, 相关性都显著。直接测量 LAI, 对植物本身具有一定破坏性, 必须人工采集叶子样品, 耗时耗力, 而且采样具有主观性, 不一定具有代表性。本系统采用间接测量 LAI, 以地物谱仪作为核心的数据采集平台, 对采集到的光谱数据通过计算机进行处理拟合, 利用光谱分析软件 ViewSpecPro, 辅助以 Excel、SPSS 等数据统计软件进行数据反演。因此, 相比于直接测量 LAI, 本系统能更快、更大范围和自动化地测量 LAI。试验表明, 光谱技术能够准确地检测植物的植被指数并反映 LAI, 利用光谱检测技术能有效地进行地面植物单株或小范围植被指数测量。该系统能提高柑橘冠层叶密度无损检测的精度, 是对单一、孤立和非连续冠层农作物叶密度建模理论及其测试技术的创新, 可提高果树叶密度无损检测精度, 为果树叶密度全方位实时监测、果树健康栽培、估产测产及精准喷药等提供理论依据, 为果树叶密度检测仪器设备、产量评估系统以及精准喷药机械研发奠定基础。从设计方法分析, 以下方面还需要进行改进: 在不同的环境条件下, 进行试验与完善, 从而使系统具有普遍性和实用性。本系统主要以光谱的 4 种形式建立线性模型, 下一步进行试验需建立非线性模型。本试验仅对正常大小、颜色统一的叶片的光谱信息进行采集、处理和分析研究, 下一步要对不同生长状况的叶片进行对比试验, 增加系统的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 刘峻明. 基于 LAI 时间序列重构数据的冬小麦物候监测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 120-129.
- [2] MATTEO D, GREGORY P A, HELENEC M, et al. Spatial variability in tropical forest leaf area density from multireturn lidar and modeling[J]. Journal of geophysical research biogeosciences, 2015, 120(2): 294-309.
- [3] 曾也鲁. 全球 LAI 地面验证方法及验证数据综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(2): 165-174.
- [4] 吴伟斌, 杜俊毅, 洪添胜, 等. 基于精确喷雾的水平叶面积指数检测[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(2): 125-130.
- [5] 袁媛. 夏玉米叶绿素及叶面积指数高光谱遥感估算[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [6] ANGELA L, MARION P, ANDREAS S, et al. Temporal hyperspectral monitoring of chlorophyll, LAI, and water content of barley during a growing season[J]. Canadian journal of remote sensing, 2013, 39(3): 191-207.
- [7] 李卫国, 蒋楠. 农作物病虫害遥感监测研究进展与发展对策[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 1-3.
- [8] 杨峰, 范亚民, 李建龙, 等. 高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 237-243.
- [9] 夏天, 吴文斌, 周清波, 等. 基于高光谱的冬小麦叶面积指数估算方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 2085-2092.
- [10] 侯学会, 牛铮, 黄妮, 等. 小麦生物量和真实叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(4): 30-35.
- [11] 唐建民, 廖钦洪, 刘奕清, 等. 基于 CASI 高光谱数据的作物叶面积指数估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1351-1356.
- [12] 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(S1): 124-128.
- [13] 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.
- [14] 高亮. 实景图像中地物对象的检测和提取[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [15] 武鹏飞, 胡列群, 李贵才, 等. 基于棉田光谱的 FY-3A/MERSI 与 MODIS 植被指数关系研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(4): 49-52.
- [16] 董恒, 何枋桢, 张城芳. 基于辐射传输模型的 FPAR_{green} 与几种植被指数的关系研究[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(4): 70-75.
- [17] 武红敢, 涂琼. WorldView2 影像的单株木监测潜力分析——以杭州西山地区为例[J]. 林业资源管理, 2012(6): 92-96.
- [18] 于延, 王建华, 段喜萍. 遥感数字影像中提取植被指数并行算法的研究与实现[J]. 科技通报, 2013, 29(2): 100-102.
- [19] 刘秀英, 臧卓, 孙华. 基于高光谱数据的杉木和马尾松识别研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(11): 30-33.
- [20] 李振, 安宏明, 苏凯. 夏玉米红边参数特征及与叶绿素、干物质相关性的研究[J]. 玉米科学, 2012, 20(2): 87-91.
- [21] 靳彦华, 熊黑钢, 张芳. 基于红边参数的水浇地与旱地春小麦各生育期叶绿素最佳估测模型比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1): 87-92.
- [22] 武永峰, 胡新, 吕国华. 晚霜冻影响下冬小麦冠层红边数比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2190-2195.

Citrus canopy LAI experiment inversion analysis with hyper-spectrum

WU Weibin^{1,2} YU Yaofeng² HONG Tiansheng^{1,2}

ZHOU Xuecheng² DENG Xiaoling² YOU Zhanhui² ZHANG Cheng² LI Jiayu²

1. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education/Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System/ Guangdong Engineering Technology Research Center for Creative Hilly Orchard Machinery, Guangzhou 510642, China;*

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

Abstract A system was established as the core of the surface features spectrometer data acquisition platform. The spectral data were collected for processing by computer fitting using spectral analysis software ViewSpecPro, Excel and SPSS statistical software for data inversion to explore four forms of the canopy of citrus spectrum and LAI (leaf area index, LAI) correlation, the advantages of the most relevant spectral parameters of LAI estimation and simulation of quantitative real-time acquisition were taken. Results showed that the correlation coefficient of LAI and spectral information on NDVI, the reflection energy of ρ_{550} , the reflection energy of ρ_{850} , the first derivative, the red edge amplitude, the red edge area was 0.886, 0.906, 0.871, 0.912, 0.798, 0.870, with equation of a significant level less than 0.05. NDVI, red edge magnitude and the edge area and LAI reached a high level of correlation. Citrus tree canopy can be simulated and estimated.

Keywords citrus-trees; canopy density; leaf area index; hyper-spectrum; inversion; surface features spectrometer

(责任编辑:陆文昌)