

基于精确喷雾的水平叶面积指数检测

吴伟斌¹ 杜俊毅² 洪添胜² 冯灼峰² 梁家越² 李爽爽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, 广州 510642;

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

摘要 果树的叶面积指数(LAI)能为精确喷雾提供重要参考依据,但常规定义从垂直方向检测叶面积指数不满足水平方向精确喷雾的实际需求。采用 LAI 近红外透射检测系统从水平方向上检测柑橘树的 LAI 值,进而计算水平方向的叶片总面积,并以应用直接法得到的叶片真实总面积作为标准值衡量误差大小,同时与垂直方向的检测结果比较。结果表明:在水平方向上东西和南北 2 个方向 LAI 检测结果的绝对误差的平均绝对值分别为 0.45 和 0.40,相对误差的平均绝对值分别为 17.37% 和 14.91%;叶片总面积的检测结果的误差与在垂直方向上应用 LAI 红外透射检测系统或 WinSCANOPY 型冠层分析仪的检测结果的误差接近;在水平方向上检测 LAI 和叶片总面积的准确性能够满足试验要求。

关键词 叶面积指数;水平检测;精确喷雾;近红外透射;叶片总面积

中图分类号 S 237; TP 274 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)02-0125-06

基于特定对象特征信息的精确喷雾技术不仅能提高农药利用率而且能避免不科学施药造成经济、环境的不良影响,是目前国内外研究的热点。应用于果树的喷雾技术主要有针对果树树冠的对靶喷雾和基于树冠形状的仿形喷雾等,其技术关键在于对果树目标、冠层分布类型的确认和对果树外形的辨别,也有学者在喷雾装置的自动化和机械化方面对其进行重点研究^[1-4],但在对果树内在参数指标与精确喷雾技术相结合方面的研究却鲜有报道。叶面积指数(leaf area index, LAI)是果树冠层生物学特征的重要参数之一,可为植物冠层表面物质与能量交换描述提供结构化的定量信息,并为农作物的精确喷雾提供参考依据。

国内外已有大量关于 LAI 的理论模型和分析方法,但都是从垂直方向上对 LAI 进行检测^[5-17],如通过测量不同波段范围的光谱平均强度反演 LAI 的光谱信息方法^[11-13],以及分析可见光成像图像从而反演 LAI 的图像处理等方法^[14-17]。另外,也有对 LAI 值快速自动化测量方法的研究,如华南农业大学研发了一个结合近红外光谱技术和虚拟仪器技术,采用三维自动行走机构,可分辨冠层重叠叶片的

果树 LAI 检测系统^[18-20]。鉴于对果树的施药一般采用水平方向的喷雾方式,常规从垂直方向对果树 LAI 的检测方式仅能衡量果树垂直方向上叶片重叠情况,不能满足水平方向喷雾的实际需要,因此,从水平方向对果树 LAI 检测的研究对水平方向精确喷雾具有重要意义。笔者在前期研究的基础上,以柑橘树为试验对象,应用 LAI 红外透射检测系统从水平方向上对 LAI 进行检测,并在水平方向上检测 LAI 的准确性进行多方位比较。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

试验地位于广东省广州市华南农业大学工程学院柑橘园。供试柑橘树品种为广东砂糖橘,供试柑橘数量为 15 株。采用盆栽的种植方式,盆内径 43.4 cm,外径 49.5 cm。供试柑橘树高 0.4~0.7 m,呈主干突出型,叶片疏散,树与树之间彼此孤立,没有遮挡,行间光照条件良好。

1.2 试验原理与检测系统

LAI 定义为单位地面投影面积上的叶片总面积,本试验中对水平方向上 LAI 值的定义为叶片总

收稿日期: 2014-06-10

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); 公益性行业(农业)科研专项(201203016);

广东省惠州市产学研结合项目(2013B050013015)

吴伟斌, 博士, 副教授, 研究方向: 机电一体化技术在农业上的应用。E-mail: wuweibin@scau.edu.cn

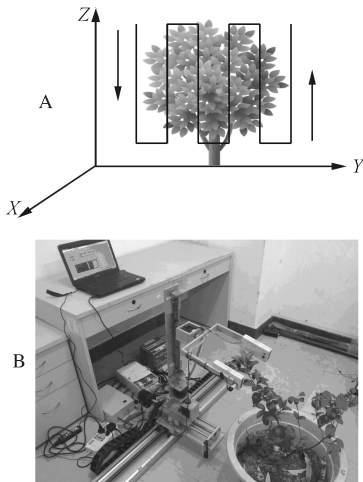
通信作者: 洪添胜, 博士, 教授, 研究方向: 农业工程、机电一体化与信息技术应用。E-mail: tshong@scau.edu.cn

面积与水平投影面积之比。根据此定义,水平方向 LAI 值与垂直方向 LAI 值应有以下关系:叶片总面积=垂直 LAI 值×垂直投影面积=水平 LAI 值×水平投影面积,即在垂直方向和水平方向上,LAI 值与对应方向上的投影面积的乘积不变,也即叶片总面积不变,此关系可用于比较垂直和水平 2 个方向 LAI 检测值的准确性。

在前期垂直方向试验基础上,将 LAI 红外透射检测系统用于从水平方向上对 LAI 值检测。试验采用全自动检测方式,通过步进电机带动 U 型架上的光源与光电传感器以 S 型路线实现从水平方向对柑橘树进行扫描。检测过程:首先将 U 型架的 X 轴位置调节至合适位置,然后调节 U 型架的 Z 轴位置使其位于柑橘树树顶上方,然后启动机器使 U 型架在 Z 轴方向由上而下移动 M 步至柑橘树底部下方,接着在 Y 轴上移动一步后,在 Z 轴方向沿反方向由下而上移动 M 步至柑橘树树顶上方,紧接着在 Y 轴上移动一步,如此重复以实现沿 S 型检测路线进行扫描。系统每行走 1 步,对电压信号采样 1 次,反演得到叶片数,在对柑橘树完整地扫描后,应用公式(1)计算水平 LAI 值。

$$L_r = \sum \frac{S_0 n_i}{S_0} N = \frac{S_{\text{总测}}}{S_{\text{投}}} \quad (1)$$

式中 S_0 为光斑面积; n_i 为检测点处叶片反演数目; N 为检测到叶片的检测点数目; $S_{\text{总测}}$ 为检测计算得到的叶片总面积; $S_{\text{投}}$ 为叶片总投影面积。水平行走路线如图 1 所示,检测程序操作界面如图 2 所示。



A. 水平行走示意图 Schematic diagram of level moving machinery; B. 行走现场 Scene drawing of level moving machinery.

图 1 水平行走路线图

Fig. 1 Route map of movement in horizontal direction

参照垂直方向叶倾角的定义,将水平方向上的叶倾角定义为叶面与水平检测方向的夹角。在 LAI 近红外透射检测系统的前期研究中^[18-19],对所有叶片总面积的检测公式为

$$S_{\text{总测}} = \sum S_0 \times n_i \quad (2)$$

式中 S_0 为光斑面积; n_i 为检测点处叶片反演数目。

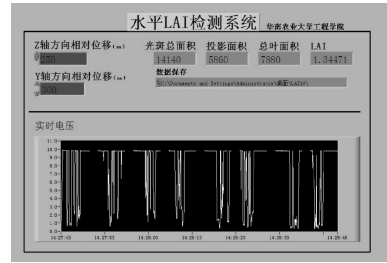


图 2 操作界面

Fig. 2 Interface of system

公式(2)忽略了叶倾角的影响,致使 $S_{\text{总测}}$ 为所有叶片投影面积的总和,而非所有叶片面积的总和。由射影定理知,叶片总面积应为

$$S_{\text{总}} \approx S_{\text{总测}} / \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) = \frac{S_{\text{总测}}}{\sin \theta} \quad (3)$$

式中 $\pi/2 - \theta$ 为叶面与投影面积平均夹角; θ 为平均叶倾角。故引入叶倾角加以修正,定义修正值为

$$L = \frac{L_r}{\sin \theta} \quad (4)$$

式中系统原检测值为 L_r 。试验中以修正值作为最终检测值。平均叶倾角的测量方法:试验选取各叶片的中心段作为测量对象,用量角器测量柑橘树的所有叶片在水平方向上的叶倾角,取所有叶片的叶倾角的平均值作为平均叶倾角。

1.3 检测方法

分东西方向和南北方向检测 15 株柑橘树的水平 LAI 值,以采用直接法检测得到的 LAI 值作为标准值来衡量检测误差,并计算水平方向 LAI 值与水平方向投影面积的乘积,得出叶片总面积。以直接法检测得到的叶片总面积作为标准值衡量检测误差,同时在垂直方向上应用本研究系统以及 Win-SCANOPY 型植物冠层分析系统检测叶片总面积作误差分析,作为水平方向检测结果的比较对象。试验流程如图 3 所示。

1) LAI 值的检测方法。在水平方向上,按指南针分东、南、西和北 4 个方向对每株柑橘树检测 3 次取平均值,并取东和西,南和北 2 个相对方向的平均值作为最终检测值。在垂直方向上,分东、南、西和北 4 个方向对柑橘树各测 1 次取平均值。同时应用

加拿大 WinSCANOPY 型冠层分析系统(阈值水平为 50%，天顶角为 5°，方位角分区为 3°)^[21-22]分东、南、西和北 4 个方向对柑橘树检测 LAI 并且取平均值作为最终检测值。

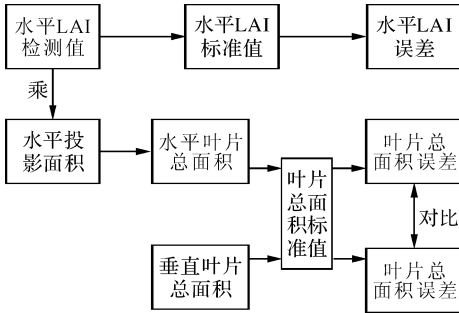


图 3 试验流程图

Fig. 3 Flow diagram of experiment

试验中采用抽样扫描法测量柑橘树的叶片真实总面积,对每株树选取东、南、西和北 4 个方向的上中下各层共 12 处各取 2 片共 24 片作为采样对象,以 A4 白纸做参照,将叶片铺在白纸上通过扫描仪扫描为图片。再利用 Matlab 软件对图片进行二值化处理,计算采样叶片的像素 N_a 和 A4 白纸的像素 N_b ,依照 A4 白纸实际面积 S_b 和公式(5)计算得到采样叶片总面积 S_a ,最后结合柑橘树总叶片数 N 和公式(6)得到果树的叶片真实总面积 $S_{总}^{[23]}$ 。

$$S_a = \frac{N_a}{N_b} S_b \quad (5)$$

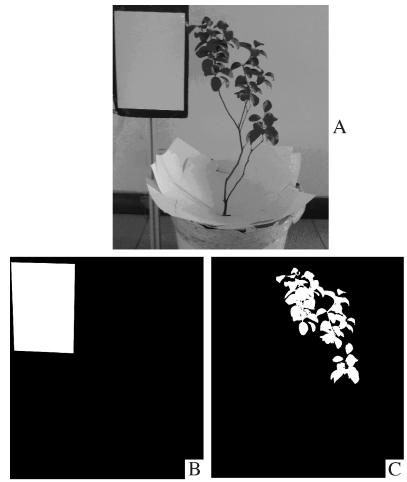
$$S_{总} = \frac{S_a}{24} N \quad (6)$$

2) 投影面积的测量方法。取 A4 白纸作参照,使其垂直于投影方向并置于果树在投影方向的最大外径处,用数码相机在投影方向上拍照得到图片,用 PhotoShop 软件处理图片并提取果树映像沿轮廓和 A4 纸轮廓,用 Matlab 软件对图片进行二值化处理,计算果树轮廓包含像素 N_t 和 A4 白纸包含的像素 N_p ,再结合 A4 白纸实际面积 S_b 由公式(7)得到果树投影面积 S_t 。水平投影面积处理过程如图 4 所示。

$$S_t = \frac{N_t}{N_p} S_b \quad (7)$$

2 结果与分析

东西方向和南北方向水平 LAI 的检测结果如表 1 和表 2 所示,2 个方向 LAI 值的相对误差范围分别为 -44.93%~32.50%和 -31.43%~34.60%,绝对值的平均值分别为 17.37%和 14.91%。



A. 水平拍摄的果树轮廓 Orchard's profile in horizontal direction; B. 二值化图像 A4 白纸轮廓 Virgin paper's outline; C. 二值化图像果树轮廓 Orchard's outline.

图 4 求果树水平投影面积的图像处理

Fig. 4 Images processing for obtaining projected area of trees in horizontal direction

在叶片总面积的检测上,表 1 和表 2 中水平方向上 2 个方向的叶片总面积的检测误差与 LAI 值的检测误差相同。表 3 为应用 LAI 近红外透射系统检测在垂直方向上检测叶片总面积的结果,叶片总面积相对误差范围为 -35.58%~25.48%,绝对值的平均值为 14.48%。表 4 为应用 WinSCANOPY 型冠层分析系统的叶片总面积检测结果,叶片总面积相对误差范围为 -51.10%~34.83%,绝对值的平均值为 21.01%。

综合分析可知,水平检测 LAI 结果与标准值接近,并且水平检测叶片总面积结果的误差与垂直检测结果的误差接近,故在水平方向检测 LAI 及叶片总面积的准确性能满足试验要求。

检测试验产生误差的原因分析:

(1) LAI 红外透射检测系统前期研究中的固有误差,包括叶厚和叶间距离的因素导致等间距模型拟合方程的误差;系统工作时传感器接收面并非一个点,而为正方面;系统标定有效量程为 22 cm,当叶子远离传感器时,所得过小的电压会导致较大误差。

(2) 系统自动行走时会碰到树枝树叶,产生抖动和偏移;光源打在叶片边缘时产生散射,传感器接受光强减少导致误差。

(3) 试验中测定柑橘树的叶倾角时所用方法太简单导致误差。

表 1 系统东西方向水平 LAI 检测结果误差分析¹⁾

Table 1 Error analysis of the result of measuring horizontal LAI in east-west direction

编号 No.	L_{H0}	L_H	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error	$S_{总}/cm^2$	$S_{H投}/cm^2$	$S_{H总}/cm^2$	绝对误差/ cm^2 Absolute error	相对误差/% Relative error	
1	1.41	1.67	0.26	18.17	1	464.82	328.66	549.30	84.47	18.17
2	2.44	2.47	0.02	0.90	2	549.28	224.73	554.20	4.92	0.90
3	3.20	3.22	0.02	0.51	3	431.75	134.72	433.94	2.19	0.51
4	3.25	1.79	-1.46	-44.93	4	519.77	159.95	286.24	-233.52	-44.93
5	2.01	2.56	0.56	27.69	5	398.06	198.26	508.29	110.23	27.69
6	2.52	2.35	-0.17	-6.62	6	475.05	188.80	443.60	-31.44	-6.62
7	2.57	1.91	-0.66	-25.77	7	586.12	228.05	435.06	-151.06	-25.77
8	2.44	2.39	-0.04	-1.79	8	791.77	325.08	777.58	-14.19	-1.79
9	2.14	2.83	0.69	32.50	9	610.62	285.83	809.09	198.47	32.50
10	3.13	2.19	-0.94	-30.02	10	1 055.62	336.86	738.71	-316.92	-30.02
11	2.31	2.95	0.64	27.83	11	603.29	261.41	771.20	167.91	27.83
12	2.77	2.51	-0.26	-9.34	12	1 019.49	368.57	924.24	-95.25	-9.34
13	3.68	4.09	0.40	10.99	13	319.35	86.71	354.44	35.09	10.99
14	2.68	2.50	-0.18	-6.80	14	442.97	165.35	412.85	-30.12	-6.80
15	2.62	2.18	-0.44	-16.64	15	639.88	244.68	533.40	-106.49	-16.64
平均值 Average value			0.45	17.37		平均值 Average value		105.48		17.37

1) L_{H0} :直接法检测的 LAI 值 LAI measured by direct method; L_H :水平方向 LAI 检测值 LAI measured from the horizontal direction; $S_{总}$:扫描法叶片真实总面积 Total leaf area measured by sampling scanning method; $S_{H投}$:水平投影面积 Horizontally-projected area; $S_{H总}$:水平方向叶片总面积检测值 Total leaf area measured from horizontal direction (表 2 同 the same as Table 2).

表 2 系统南北方向水平 LAI 检测结果误差分析

Table 2 Error analysis of the result of measuring horizontal LAI in south-north direction

编号 No.	L_{H0}	L_H	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error	$S_{总}/cm^2$	$S_{H投}/cm^2$	$S_{H总}/cm^2$	绝对误差/ cm^2 Absolute error	相对误差/% Relative error	
1	1.86	2.29	0.43	23.06	1	464.82	249.42	572.00	107.18	23.06
2	2.12	1.99	-0.13	-6.13	2	549.28	258.64	515.63	-33.65	-6.13
3	2.28	2.33	0.04	1.91	3	431.75	189.19	439.99	8.24	1.91
4	3.95	2.71	-1.24	-31.43	4	519.77	131.65	356.41	-163.36	-31.43
5	2.17	2.48	0.31	14.19	5	398.06	183.21	454.54	56.47	14.19
6	2.54	2.48	-0.06	-2.24	6	475.05	187.22	464.39	-10.66	-2.24
7	2.77	2.51	-0.26	-9.50	7	586.12	211.70	530.47	-55.65	-9.50
8	3.30	2.38	-0.92	-27.87	8	791.77	239.96	571.12	-220.65	-27.87
9	2.20	2.59	0.39	17.95	9	610.62	278.15	720.20	109.58	17.95
10	3.10	2.59	-0.51	-16.46	10	1 055.62	340.61	881.88	-173.75	-16.46
11	2.26	3.04	0.78	34.60	11	603.29	267.48	812.01	208.72	34.60
12	3.02	2.75	-0.27	-9.01	12	1 019.49	337.42	927.68	-91.81	-9.01
13	2.94	2.92	-0.03	-0.86	13	319.35	108.46	316.60	-2.75	-0.86
14	2.68	2.77	0.09	3.38	14	442.97	165.39	457.96	14.99	3.38
15	2.35	2.94	0.59	25.06	15	639.88	272.33	800.25	160.37	25.06
平均值 Average value			0.40	14.91		平均值 Average value		94.52		14.91

表 3 系统垂直 LAI 检测结果误差分析¹⁾

Table 3 Error analysis of the result of measuring vertical LAI

编号 No.	L_{V0}	L_V	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error	$S_{总}/cm^2$	$S_{V投}/cm^2$	$S_{V总}/cm^2$	绝对误差/ cm^2 Absolute error	相对误差/% Relative error	
1	2.23	1.66	-0.57	-25.42	1	464.82	208.52	346.66	-118.16	-25.42
2	1.72	1.85	0.13	7.46	2	549.28	318.91	590.26	40.98	7.46
3	1.88	1.93	0.05	2.43	3	431.75	229.42	442.26	10.51	2.43
4	1.67	1.65	-0.02	-1.27	4	519.77	311.11	513.15	-6.62	-1.27
5	1.79	1.53	-0.26	-14.74	5	398.06	221.94	339.40	-58.66	-14.74
6	1.59	1.41	-0.18	-11.39	6	475.05	298.20	420.94	-54.10	-11.39
7	2.50	2.02	-0.48	-19.16	7	586.12	234.43	473.82	-112.30	-19.16
8	2.34	2.11	-0.24	-10.16	8	791.77	337.65	711.32	-80.45	-10.16
9	1.96	1.69	-0.27	-13.80	9	610.62	310.84	526.33	-84.28	-13.80
10	2.39	1.54	-0.85	-35.58	10	1 055.62	442.11	679.99	-375.63	-35.58
11	1.33	1.66	0.34	25.48	11	603.29	454.74	756.98	153.70	25.48
12	2.39	1.58	-0.81	-33.93	12	1 019.49	427.24	673.54	-345.95	-33.93
13	1.51	1.53	0.02	1.03	13	319.35	210.93	322.66	3.30	1.03
14	1.81	1.67	-0.14	-7.70	14	442.97	245.13	408.87	-34.10	-7.70
15	1.48	1.60	0.11	7.60	15	639.88	431.19	688.49	48.61	7.60
平均值 Average value			0.30	14.48		平均值 Average value		101.82		14.48

1) L_{V0} :应用直接法检测的 LAI 值 LAI measured by direct method; L_V :垂直方向 LAI 检测值 LAI measured from vertical direction; $S_{总}$:抽样扫描法得到的叶片真实总面积 Total leaf area measured by sampling scanning method; $S_{V投}$:垂直投影面积 Vertically-projected area; $S_{V总}$:垂直方向上叶片总面积检测值 Total leaf area measured from vertical direction (表 4 同 the same as Table 4).

表4 WinSCANOPY型仪器LAI检测结果误差分析

Table 4 Error analysis of the result of measuring LAI using WinSCANOPY

编号 No.	L_{V0}	L_V	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error	$S_{总}/cm^2$	$S_{V投}/cm^2$	$S_{V总}/cm^2$	绝对误差/ cm^2 Absolute error	相对误差/% Relative error	
1	2.23	1.68	-0.55	-24.63	1	464.82	208.52	350.32	-114.51	-24.63
2	1.72	2.31	0.59	34.26	2	549.28	318.91	737.47	188.19	34.26
3	1.88	2.27	0.39	20.75	3	431.75	229.42	521.35	89.60	20.75
4	1.67	2.25	0.58	34.83	4	519.77	311.11	700.79	181.02	34.83
5	1.79	1.64	-0.15	-8.56	5	398.06	221.94	363.98	-34.09	-8.56
6	1.59	1.50	-0.10	-6.15	6	475.05	298.20	445.81	-29.24	-6.15
7	2.50	1.57	-0.93	-37.21	7	586.12	234.43	368.05	-218.07	-37.21
8	2.34	1.95	-0.39	-16.74	8	791.77	337.65	659.26	-132.50	-16.74
9	1.96	1.99	0.03	1.43	9	610.62	310.84	619.35	8.73	1.43
10	2.39	1.17	-1.22	-51.10	10	1055.62	442.11	516.17	-539.46	-51.10
11	1.33	1.45	0.12	9.11	11	603.29	454.74	658.24	54.95	9.11
12	2.39	1.65	-0.73	-30.75	12	1019.49	427.24	706.02	-313.47	-30.75
13	1.51	1.47	-0.04	-2.74	13	319.35	210.93	310.60	-8.75	-2.74
14	1.81	1.73	-0.07	-4.13	14	442.97	245.13	424.68	-18.29	-4.13
15	1.48	1.97	0.49	32.75	15	639.88	431.19	849.43	209.55	32.75
平均值 Average value			0.43	21.01	平均值 Average value			142.69	21.01	

3 讨论

本试验采用从水平方向上检测柑橘树 LAI 的方法,其 LAI 检测系统基于红外透射原理。通过从水平方向上的东西和南北 2 个方向分别检测柑橘树的 LAI 值,得出检测结果的绝对误差的平均绝对值分别为 0.45 和 0.40,相对误差的平均绝对值分别为 17.37% 和 14.91%。在叶片总面积的检测上,水平方向上的检测结果误差等于 LAI 检测的误差,作为准确性对比,在垂直方向上应用 LAI 近红外透射系统和 WinSCANOPY 型冠层分析系统进行检测,检测结果的绝对误差的平均绝对值分别为 0.30 和 0.43,相对误差的平均绝对值分别为 14.48% 和 21.01%。检测结果表明,在水平方向上检测 LAI 和叶片总面积的准确性符合试验要求。

本试验仅在水平方向上检测 LAI 的准确性,而精确喷雾中需要从多角度的不同方向获得叶密度信息以精准控制施药量,故在多角度和多方向的 LAI 检测技术方面,还需要对任意角度下 LAI 的检测准确性进行试验,研究检测角度对近红外透射技术 LAI 检测值的准确性影响。

参 考 文 献

[1] 张富贵,洪添胜,王锦坚,等.现代农药喷施技术及装备研究进展[J].农机化研究,2011(2):209-213.
 [2] 傅泽田,祁力钧,王俊红.精准施药技术研究进展与对策[J].农业机械学报,2007,38(1):191-192.
 [3] 张俊雄,曹峥勇,耿长兴,等.温室精准对靶喷雾机器人研制[J].农业工程学报,2009,25(S2):70-73.

[4] 陈焱焱,刘权,邵陆寿,等.智能型喷雾机械控制策略与软件实现[J].农业机械学报,2009,40(1):79-82.
 [5] JONCKHEERE I, FLECK S, NACKAERTS K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I: theories, sensors and hemisphere photography [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1/2): 19-35.
 [6] HYER E J, GOETZ S J. Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122(3/4): 157-174.
 [7] 吴伟斌,洪添胜,王锡平,等.叶面积指数地面检测方法的研究进展[J].华中农业大学学报,2007,26(2):270-275.
 [8] 程武学,潘开志,杨存建.叶面积指数(LAI)测定方法的研究进展[J].四川林业科技,2010,31(3):51-54.
 [9] 曾也鲁,李静,柳钦火.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.
 [10] 刘谿源,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.
 [11] 林卉,梁亮,张连蓬,等.基于支持向量机回归算法的小麦叶面积指数高光谱遥感反演[J].农业工程学报,2013,29(11):139-146.
 [12] 梁亮,杨敏华,臧卓.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.
 [13] 吴伟斌,冯灼峰,洪添胜,等.基于近红外反射的柑橘重叠叶片叶面积指数测量系统[J].农业机械学报,2013,44(1):179-184.
 [14] RYU Y, VERFAILLIE J, MACFARLANEM C, et al. Continuous observation of tree leaf area index at ecosystem scale using upward-pointing digital cameras [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 126: 116-125.
 [15] LIU J, PATTEY E. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1485-1490.

- [16] DEMAREZ V, DUTHOIT S, BARET F, et al. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(4):644-655.
- [17] 王方永, 王克如, 李少昆, 等. 利用数字图像估测棉花叶面积指数[J]. *生态学报*, 2011, 33(11):3090-3100.
- [18] 屈永华, 王锦地, 董健, 等. 农作物冠层结构参数自动测量系统设计及试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2):160-165.
- [19] 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.
- [20] 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):169-174.
- [21] 姚青青, 王斌, 杨涛, 等. 棉花冠层结构测定方法探讨[J]. *中国棉花*, 2011(7):18-20.
- [22] ZHANG L, HONG T, WU W, et al. Detection of LAI for fruit-based on hemispherical photography [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(S2):213-220.
- [23] 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.

LAI measurement from horizontal direction for precision spraying

WU Wei-bin¹ DU Jun-yi² HONG Tian-sheng² FENG Zhuo-feng²
LIANG Jia-yue² LI Shuang-shuang²

1. *Key Laboratory of Key Technology for Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;*
2. *College of Engineering, South China Agricultural University/Machinery Laboratory of China Agriculture (Citrus) Research System, Guangzhou 510642, China*

Abstract Leaf area index (LAI) of fruit trees provides significant references for precision spraying. However, measuring LAI from the vertical direction conventionally does not conform to the actual demand of lateral precision spraying. In this paper, using measuring system of citrus LAI with near-infrared transmittance technique, LAI of citrus trees was measured from the horizontal direction, the total leaf area was calculated, and then the real leaf area was obtained by direct method as standard values to measure the error. The experimental result was that the average absolute value of the absolute errors were 0.45 and 0.40 respectively, and average absolute value of the relative errors were 17.37% and 14.91% respectively when measuring in east-west direction and south-north direction. Besides the error of measuring the total leaf area was not much different with the error of measuring from vertical direction by using the system or WinSCANOPY Canopy analysis system. It shows that the accuracy of measuring LAI or total leaf area from horizontal direction meets the requirement of the experiment.

Key words leaf area index; horizontal measurement; precision spraying; near-infrared transmission; total leaf area

(责任编辑:陈红叶)