

野外叶面积指数自动测量仪器设计及应用试验

温一博, 范文义*, 常 颖, 李明泽, 于宏洲, 王宇航

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 为提高长时间序列叶面积指数测定模型的模拟精度, 该文设计一种可以长期在野外间接测量叶面积指数仪器, 仪器由太阳能提供持久电能, 利用单片机控制垂直水平舵机, 带动光强传感器记录多角度光线强度, 在 2 台仪器同时测量的情况下, 获得光线透过林分冠层多角度光强衰减率, 通过编写计算程序解算林分叶面积指数。使用商品化光学仪器 LAI-2200 验证该仪器测量精度, 对 24 块样地叶面积指数进行测量, 两仪器测量结果高度吻合 R^2 为 0.927, 绝对标准误差为 0.36。长时间野外叶面积指数自动测量获取数据可节省人力、减少人为误差。

关键词: 仪器; 测量误差; 设计; 叶面积指数; 长期测量; 设计; 单片机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.024

中图分类号: S23

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0154-07

温一博, 范文义, 常 颖, 等. 野外叶面积指数自动测量仪器设计及应用试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 154—160.

Wen Yibo, Fan Wenyi, Chang Ying, et al. Design and applied experiment of long time series leaf area index measuring instrument[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 154—160. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 是单位土地面积上所有叶片表面积总和的一半^[1-4], 是植物群体和群落生长分析的重要参数和评价指标, 在农业、林业及生态学等领域得到了广泛的应用^[5-6]。准确获取叶面积指数是近些年来研究热点^[7-8]。叶片是植物重要的营养器官, 大部分光合作用在叶片完成, 同时蒸腾作用也是通过叶片的气孔来实现的, 是植物与外界进行物质、能量交换的主要器官, 因此, 叶面积指数是衡量植物固碳能力和蒸腾作用的重要参数^[9-12]。叶面积指数已经被认为是描述森林健康、研究植被与外界的能量循环、物质循环的重要指标^[13-14]。

长期观测森林叶面积指数, 在精度检验后作为森林碳循环及水循环日步长过程模型的输入参数, 可以提高森林碳水循环的模拟精度^[15-16]。同时也可以作为遥感影像进行森林类型识别的特征。

叶面积指数获取分为样地尺度和区域尺度^[17]。样地尺度叶面积指数获取就是指 LAI 的实地测量, 实地测量 LAI 分为直接测量法和间接测量法^[18-20]。区域尺度 LAI 获取一般是指遥感估算或反演叶面积指数, 在实地测量 LAI 数据的支持下, 通过建立遥感数据与叶面积指数的统

计模型或机理模型, 计算遥感影像区域的叶面积指数, 得到的结果可作为区域或全球变化研究的重要基础数据^[21]。在建立 LAI 的遥感估算或反演模型时需要 LAI 的样地数据, 同时还必须用 LAI 的样地数据对模型进行独立性检验, 所以 LAI 样地测量是遥感反演的基础工作^[17]。目前, LAI 样地测量法主要分为具有破坏性的直接测量法和基于光学模型的间接测量法, 直接测量法包括择伐标准木、抽取标准枝和标准叶的真实测量法和探针接触法等, 由于直接测量法破坏植被耗时、耗力而且无法获得时间序列数据, 现很少被研究者所应用^[22-23]; 间接测量法是使用 LAI-2000 系列、TRAC、Sunscan 等光学仪器在林下进行测量^[17], 但这些仪器都是人工操作瞬时对 LAI 进行记录, 不具备自动的连续观测能力, 要获取林分时间序列数据需要研究人员长期在野外实地测量, 很难获得不同林分类型的叶面积指数生长数据, 而且在长期重复测量中, 测量位置、角度复位等会造成较大人为误差。本发明涉及一种长时间序列野外森林叶面积指数测量仪器与技术, 由太阳能提供电源利用舵机带动光强传感器收集多角度林下衰减光, 利用米勒定律和贝尔定律计算叶面积指数, 提供了一个非破坏性准确获取时间序列叶面积指数的可行方法。

1 叶面积指数测定的理论基础

本仪器的光学原理是通过 2 台仪器获得多个角度光线透过森林冠层的衰减率, 再基于贝尔定律和米勒定律计算森林冠层叶面积指数^[24-25]。贝尔定律用于描述光线透过均匀介质后衰减规律。

$$I = I_0 \exp(-x) \quad (1)$$

式中: I_0 为入射能量, cd; I 为通过 x 距离的均匀介质后

收稿日期: 2014-10-31 修订日期: 2015-03-24

基金项目: “十二五” 国家科技支撑项目 (2011BAD08B01); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572014AA37)

作者简介: 温一博, 男 (汉族), 黑龙江省佳木斯人, 东北林业大学林学院, 博士生, 主要从事定量遥感研究。哈尔滨 东北林业大学林学院, 150040。

Email: 100004644@qq.com

*通信作者: 范文义, 男 (汉族), 内蒙古赤峰人, 博士, 博士生导师, 主要从事定量遥感研究。哈尔滨: 东北林业大学林学院, 150040。Email: fanwy@163.com

衰减得到的能量, cd。如果穿过的介质均匀消光系数为 a , 介质浓度为 C 。即:

$$\frac{dI}{I} = -aCdx \quad (2)$$

公式变为:

$$I = I_0 \exp(-aCx) \quad (3)$$

求解得到:

$$\ln \left[\frac{I_0}{I} \right] = aCx \quad (4)$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-aCx} \quad (5)$$

式中: I_0/I 即为透过率, %。

在林业冠层研究时, 考虑到不同方向光线透过林冠层衰减时, 引进与光线入射角度相关的消光系数用 $P(\theta)$ 表示, 将每片叶子的消光系数理解为均匀消光系数为 a 用 $G(\theta)$ 来表示, 假设冠层有 L 层有效叶子:

$$P(\theta) = e^{-G(\theta)L/\cos\theta} \quad (6)$$

米勒定律公式为:

$$F = 2 \int_0^{\pi/2} f(\beta) \sin \beta d\beta \quad (7)$$

式中: F 为碰撞频率, 在森林冠层中可以理解为平均叶面积密度, 即单位体积内的叶面积指数。

1991 年陈镜明设 $k(\theta)$ 为光线在 θ 角度透过冠层时被拦截的次数, 将公式改写为:

$$L = 2 \int_0^{\pi/2} k(\theta) \sin \theta d\theta \quad (8)$$

那么消光系数 $G(\theta)$ 就可以理解为有效的 L 层叶子, 被拦截了 $k(\theta)$ 次:

$$G(\theta) = k(\theta) / L \quad (9)$$

由公式 (6) 得:

$$-\ln P(\theta) \cos \theta = G(\theta)L \quad (10)$$

将公式 (9) (10) 带入公式 (8) 得到:

$$\begin{aligned} -2 \int_0^{\pi/2} \ln P(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta = \\ 2L \int_0^{\pi/2} G(\theta) \sin \theta d\theta = L \end{aligned} \quad (11)$$

最终得到测量原理:

$$L = -2 \int_0^{\pi/2} \ln P(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (12)$$

通过测量多角度的 $P(\theta)$, 获得林分叶面积指数数据。

2 样机原理与设计

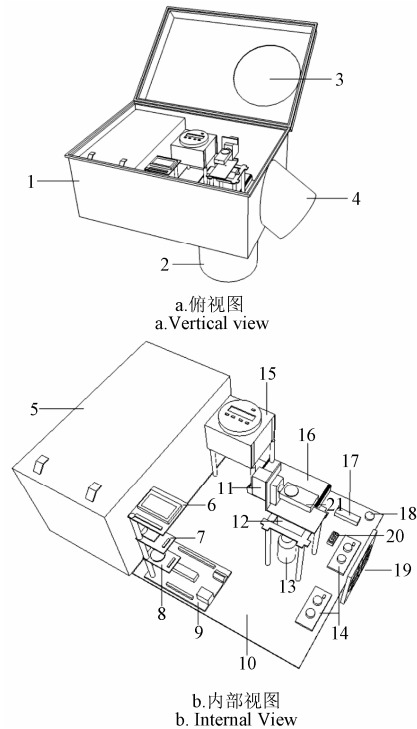
2.1 总体方案设计

根据米勒定律, 在获得多角度光线透过森林冠层的衰减率后, 经过计算可以得到森林冠层叶面积指数数据。本仪器利用水平舵机和垂直舵机带动光强传感器旋转来获得多角度光强数据, 测量时利用 2 台仪器配合, 一台放置待测林分冠层下记录光线透过冠层后的光强, 一台放置待测林分附近的空旷地 (如林场场部等) 记录未透过冠层的光强即冠层上方光强, 二者相比得到多角度光强衰减率。本仪器目的为长期观测森林叶面积指数数据,

根据需求设计一种由太阳能供电系统、时控系统、单片机控制系统组成的仪器, 其中单片机控制系统包括 Arduino UNO 单片机、时间模块、SD 卡模块、显示屏模块、舵机、光强传感器、温湿度传感器。

2.2 结构设计

本仪器除太阳能供电板外均放置在防水外壳内, 光强传感器上端为高透度半球防水罩。各部件位置如图 1 所示。



1. 防水外壳 2. 温湿度传感器防水罩 3. 高透度半球防水罩 4. 防水散热罩
5. 蓄电池 6. 显示屏模块 7. SD卡模块 8. 时钟模块 9. Arduino UNO单片机
10. 防水层 11. 垂直旋转舵机 12. 水平旋转舵机 13. 温湿度传感器
14. 降压模块 15. 时控开关 16. 太阳能控制器 17. 保险管 18. 连接太阳能航空插头 19. 通风风扇 20. 三项开关 21. 光强传感器

1. Waterproof case of instrument 2. Waterproof case of humidity and temperature sensor 3. High anti-reflecting hemispherical shell 4. Waterproof radiator 5. Storage battery 6. Display monitor module 7. Storage module 8. Clock module 9. Arduino UNO microcontroller 10. Waterproof layer 11. Vertical rotary servo 12. Horizontal rotary servo 13. Temperature sensor and humidity sensor 14. Dropping resistor 15. Time switch 16. Solar controller 17. FUSE 18. AMD standard aviation plugs connected with solar panel 19. Ventilating fan 20. Push switch 21. Light sensor

图 1 仪器结构示意图

Fig.1 Structure drawing of instrument

仪器中防水层为 2 mm 中空结构, 可以防止露水、少量雨水进入外壳对电子仪器的影响; 保险管限制仪器最高电流为 3 A, 降低仪器在野外恶劣条件下运行时出现短路发热危险; 通风风扇减少仪器内部和野外环境温差, 较大限制野外测量时仪器露水形成; 三项开关可以选择断电状态、常通电状态和连接时控开关状态, 常通电状态方便仪器测试时使用, 连接时控开关状态时, 时控开关会根据预先设置的时间周期为仪器周期性连接电源、断开电源, 这样有效的节省非测量时单机电能消耗。光强传感器为日本 RHOM 株式会社推出的 16 位高精度数字光强度传感器 BH1750FVI, 信号传输采用 I²C 总线接口, 避免了 A/D 转换系统带来的误差, 所用传感器在出厂时均已进行定标, 感光范围为 300~700 nm 波长光强。为

了减小叶片散射、反射阳光对光线透过冠层衰减率测量的影响,本仪器在 BH1750FVI 传感器上方添加了 500 nm 低通滤光片,将传感器感光范围限制在 300~500 nm 之间。

2.3 工作原理

为测得森林冠层多角度光线衰减度,使用 2 台仪器分别测量林外光强和林下光强,仪器通过三脚架固定、调平。仪器内部依靠单片机控制舵机旋转,水平舵机每旋转一周称为一环,每旋转一环后调整垂直舵机角度并进行下一环旋转,旋转方式如图 2 所示。在舵机旋转同时记录当前角度的光强数据,最终根据测量时间建立文件记录一组光强数据值,并写入 SD 卡中。

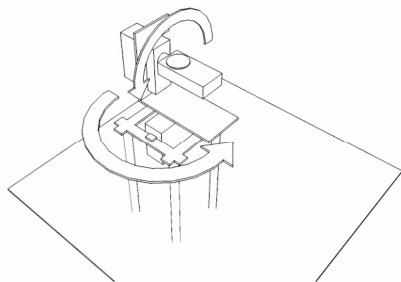


图 2 水平、垂直方向舵机旋转原理

Fig.2 Rotation principle of horizontal and vertical servo

根据陈镜明教授研究,在叶片呈现不同角度分布时,观测角度在 57°时消光系数相近为 0.5 左右,随着观测角度的增大,观测截面的树干树枝与叶子比例增加导致消光系数不稳定,树干树枝对测量叶面积指数有较大影响。根据这一原理,本仪器设计测量时垂直舵机最大观测角度为 60°,仪器采用的光强传感器观测视角为 7°,经测试对比最终设计仪器 6 环观测,其垂直方向观测角度分别为 0°、12°、24°、36°、48°、60°。

本仪器在野外测量时可利用时控开关设置采样时间,为减少某一方向强光对测量结果的影响,采样时间设置为上午 07:00~08:00 和下午 16:00~17:00。

3 软件实现

通过林下和空旷地 2 台仪器同时测量,可以得到多角度光线透过森林冠层的衰减率,利用米勒定律求得叶面积指数,本研究采用 VB 语言编写计算程序,实现叶面积指数的解算。程序包括叶面积指数计算模块、批量运算模块、时间校正模块和传感器校正模块,主程序界面如图 3 所示。



图 3 解算程序界面

Fig.3 Program window

3.1 叶面积指数解算模块

单文件叶面积指数计算模块可以将各角度测量值(通常空旷地光强称为 Above 值、林冠层下方光强称为 Below 值)和计算后得到各角度光线强度衰减率以矩阵形式表达在程序界面上,可以直观的看到林分下各角度光强衰减率分布,方便对林分多角度透光性进一步研究;批量计算模块可以通过自动匹配时间间隔最短的 Above、Below 值文件,解算指定时间段内的叶面积指数,实现解算大量长期野外观测数据。

3.2 时间校正模块

时间校正模块可以纠正长期野外观测中仪器时钟模块走时误差带来的文件记录时间偏差,通过记录 2 台仪器开始测量时间和结束测量时间利用拉伸公式,将 2 台仪器时间统一,公式如下:

$$T'_{bx} = T_{bx} + \frac{T_{ae} - T_{as}}{T_{be} - T_{bs}} \cdot (T_{bx} - T_{bs}) \quad (13)$$

式中: T_{as} 为 A 仪器开始测量时间点, T_{ae} 为 A 仪器测量结束时间点, $T_{ae} - T_{as}$ 为 A 仪器记录的运行总时间, s; T_{bs} 为 B 仪器开始测量时间点, T_{be} 为 B 仪器结束测量时间点, $T_{be} - T_{bs}$ 为 B 仪器记录的总运行时间, s; T_{bx} 为 B 仪器测量时记录时间点, $T_{bx} - T_{bs}$ 为 B 仪器测量是运行时间, s; T'_{bx} 为 T_{bx} 调整后时间。

3.3 传感器校正模块

传感器校正模块可以纠正不同仪器记录光强值的测量偏差,不同仪器由于半球防水罩、传感器自身等原因会造成在相同测量条件下测量结果的轻微偏差,这些轻微偏差会影响冠层透光率的计算结果,本仪器在叶面积指数测量前需将 2 台仪器放置相同测量条件下进行校正测量(具体做法见 5.1),测量后的数据利用计算程序求解出 B 仪器相比 A 仪器的各个环光强记录增益和偏移,即:

$$L_{bi} = g_i + o_i \cdot L_{ai} \quad (14)$$

式中: L_{ai} 为 A 仪器第 i 环记录的光强值, cd; L_{bi} 为 B 仪器第 i 环记录的光强值, cd; g_i 是第 i 环增益; o_i 是第 i 环偏移,程序利用最小二乘法原理进行求解,原理为:

$$\hat{g}_i + \hat{o}_i \cdot L_{ai} + e_i = g_i + o_i \cdot L_{ai} \quad (15)$$

式中: \hat{g}_i 、 \hat{o}_i 为 g_i 、 o_i 的估计值, e_i 为残差,选择 g_i 、 o_i 使所有数据点的残差平方和 ($\sum e_i^2$) 达到最小,作为 g_i 、 o_i 的估计值,修正 2 台仪器的测量偏差。

4 野外试验方法

4.1 仪器校准

根据前文米勒定律可知,为获得冠层叶面积指数数据,本仪器需要两台同时使用,分别测量光线透过林冠层前后光强,从而获得光线透过林冠层衰减率。2 台仪器在测量各角度光线强度时会受到传感器自身、半球防水罩透明度等影响,为消除这些不同仪器间的测量偏差,检验不同仪器间测量的稳定性。使用本仪器进行叶面积指数测量前需要对 2 台仪器光强记录值进行校正,校正方法是将 2 台仪器放置在相同测量条件下同时测量周围

各角度光线强度，根据记录的数值分析 2 台仪器测量值关系，以一台仪器为基准将另一台仪器记录值进行校正。

4.2 仪器精度测量

使用本仪器与商品化仪器 LAI-2200 对多块样地叶面积指数进行测量，对比测量结果检验测量精度。LAI-2200 是目前国内外叶面积指数研究最为广泛使用的光学测量仪器，仪器配有 148°的“鱼眼”光学传感器，可从 5 个不同角度的天顶角方向测定光强，其解算 LAI 原理与本文设计仪器解算 LAI 原理相同。

测量结果以 LAI-2200 为检验标准，计算本仪器测量叶面积指数的标准误差、绝对标准误差、平均百分误差、平均绝对百分误差，计算公式如下。

1) 标准误差 (ME)：

$$ME = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right) \quad (16)$$

2) 绝对标准误差 (MAE)：

$$MAE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \quad (17)$$

3) 平均百分误差 (MRE)：

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right) \times 100\% \quad (18)$$

4) 平均绝对百分误差 (MARE)：

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \times 100\% \quad (19)$$

式中： y_i 为 LAI-22200 测量第 i 块样地的叶面积指数值 \hat{y}_i 为本仪器测量对应样地的叶面积指数值。

4.3 仪器稳定性测试

将本仪器长时间放置野外进行自动测量，检验仪器运行稳定性和安全性。

5 野外试验结果

5.1 仪器校准结果

图 4 为 2 台仪器放置在相同条件下的校正测量。通过 1 h 的测量计算出 2 台仪器在相同条件下的测量偏差，并进行校正消减仪器间的测量偏差。



图 4 测量前仪器校正

Fig.4 Instrument calibration before measuring

以 2014 年 9 月 4 日 16:00 东北林业大学试验林场校正测量为例，仪器 6 个观测环记录 840 个光强测量值，如图 5 所示。

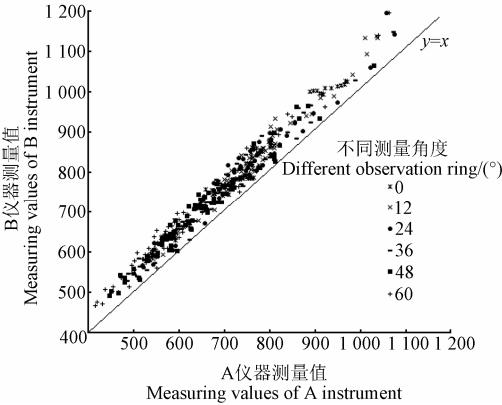


图 5 两台仪器各环数据对比

Fig.5 Contrast two instruments rings data

通过测量结果可以发现，2 台仪器对光线强度记录值呈稳定线性关系，以 A 仪器测量值为基准校正 B 仪器，可以使用计算程序的校正功能模块，利用最小二乘法求解，计算出各个环增益、偏移及方差如下表 1。

表 1 校正数据

Table1 Data correction

角度 Angle/(°)	增益 Gain	偏移 Offset	决定系数 Coefficient of determination
0	1.0475	30.578	0.9674
12	1.0741	12.894	0.9789
24	1.0456	32.341	0.9689
36	1.0657	16.935	0.9765
48	1.0482	27.749	0.9732
60	1.0551	31.199	0.9761

5.2 仪器精度测量结果

2014 年 7 月使用本仪器在东北林业大学试验林场 24 块样地进行测试，同时使用商品化仪器 LAI-2200 进行精度比较，其中针叶林 6 块，树种为樟子松林和黑皮油松林，阔叶林 16 块，树种为水曲柳林、胡桃楸林和杨树林，混交林 2 块，主要树种有落叶松、白桦、胡桃楸混交林，测量结果如图 6 所示。

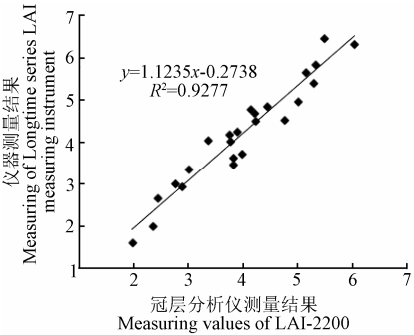


图 6 测量结果对比

Fig.6 Comparison of measurement results

从图 6 可以看出，本仪器在各样地叶面积指数测量结果与 LAI-2200 测量结果高度吻合，在 24 块临时样地中，用本仪器测得的叶面积指数最小值为 1.625、最大值为 6.323、平均值 4.21，LAI-2200 测得的相应的最小值为

1.97、最大值为 6.04、平均值 3.99。24 块样地叶面积指数主要分布在 3 到 4 之间, 2 仪器测量结果具有较高相关性, 其中针叶林测量结果与 LAI-2200 测量结果平均偏低 0.148, 阔叶林测量结果与 LAI-2200 测量结果平均偏高 0.378。测量精度如表 2 所示。

表 2 测量精度结果分析

Table 2 Analysis of measurement accuracy results

标准误差 ME	绝对标准误差 MAE	平均百分误差 MRE/%	平均绝对百分误差 MARE/%
-0.22	0.36	3.62	9.16

结果表明, 本仪器对林分叶面积指数测量结果与商品化仪器 LAI-2200 测量值相近, 能够满足应用要求。

5.3 仪器稳定性测试结果

在 2014 年 7 月 20 日至 8 月 23 日期间, 将本仪器放置东北林业大学帽儿山林场三号试验基地进行稳定性测试, 测量期间仪器运行稳定, 测量后蓄电池电压没有降低现象说明 50 W 太阳能供电板在林分天窗下接收太阳能可以满足仪器运行耗电量, 防水罩可以防止林下高湿度环境对电子仪器的影响。叶面积指数数据测量值稳定在 3.4~3.6, 测量结果符合东北盛夏植物习性无明显抽枝发叶现象。温湿度传感器每 5 min 记录 1 次数据, 下图为 8 月 2 日和 8 月 10 日本仪器记录温湿度值。

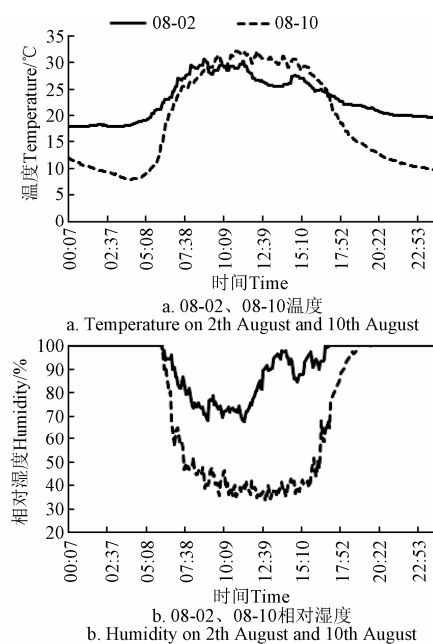


图 7 仪器 8 月 2 日、8 月 10 日温湿度测量结果

Fig.7 Measurement results of temperature and humidity On 2th August and 10th August

8 月 2 日 11 点后有降雨, 图中温湿度记录均有明显变化, 降雨时温度降低空气相对湿度明显增加。8 月 10 晴天, 通过温度记录可以看出帽儿山林场气温已有较大温差, 中午相对湿度较 8 月 2 日明显降低。这些数据可以为日后叶面积指数变化研究、生态研究提供辅助数据。

6 结论与讨论

本文研究的长时间序列野外叶面积指数测量仪, 以单片机为控制核心, 利用舵机带动光强传感器获得各角度光强数据, 通过 2 台仪器同时使用计算光线透过林冠层各角度光强衰减率, 从而解算出林分叶面积指数数据。仪器具有防水外壳可适应林区天气, 保证主体及传感器的工作寿命和工作稳定性。仪器可长期的野外自动观测, 取代过去人工野外重复测量, 节省人力, 减少人为误差。仪器造价成本较低适合对不同立地条件林分布点测量。本文主要研究结论如下:

1) 通过硬件设计和软件编写实现野外长时间序列的叶面积指数的观测和解算。仪器由太阳能供电, 单片机自动控制, 可在野外长期收集多角度光强数据, 程序针对仪器特点实现采集数据, 解算叶面积指数的功能。

2) 精度测试中, 在不同叶面积指数林分中, 测量结果表明, 本仪器的测量值与 LAI-2200 测量叶面积指数 R^2 0.927, 绝对标准误差 0.36, 平均百分误差 3.62%。差异主要出现在不同林种中, 相同林种下差异较小, 通过精度验证说明本仪器可以客观描述长时间内林分叶片生长、凋落带来的叶面积指数值的变化。

3) 稳定性测试中, 仪器在野外高湿条件下运行良好, 太阳能供电系统可以提供仪器长期测量的电能, 2 台仪器光强传感器测量林下光强衰减率稳定。

仪器配有空气温度、湿度传感器, 测量叶面积指数同时可记录野外温度、湿度数据, 为研究植物生长、叶面积指数变化规律提供野外实测数据。本仪器采用米勒定律、贝尔定律解算叶面积指数, 适用于测量具有冠幅结构植被的叶面积指数。叶面积指数在农业中是作物估产和病害评价关键参数, 长期观测农作物、果树叶面积指数变化, 可为信息化监测和预报生长情况提供数据支撑。本仪器可用于高大农作物、果树的叶面积指数动态变化监测和研究。

根据仪器测量数据特点编写了解算程序包括仪器的时间、光强校正模块, 减少仪器间的测量偏差。计算模块中实现了单个文件叶面积指数计算和批量文件叶面积指数计算, 方便进一步研究所需。本文在稳定性测试中, 时间上错过了东北地区乔木树叶生长旺盛期, 没有观测到明显叶面积指数变化, 在下一步研究中利用本仪器在春季东北乔木生长季对林分叶面积指数进行调查研究。

[参 考 文 献]

- [1] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant Cell & Environment, 1992, 15(4): 421—429.
- [2] Chen J M, Black T A. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 60(3): 249—266.
- [3] Chen J M, Cihlar J. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index[J]. Applied Optics, 1995, 34(27): 6211—6222.

- [4] Chen J M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80(2): 135—163.
- [5] Ganopolski Andrey, Kubatzki Claudia, Claussen Martin, et al. The influence of vegetation-atmosphere-ocean interaction on climate during the mid-Holocene[J]. *Science*, 1998, 280(5371): 1916—1919.
- [6] 刘镭源, 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 on winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(3): 220—224. (in Chinese with English abstract)
- [7] Chen J M. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69(1): 30—42.
- [8] 朱高龙, 居为民, 范文义, 等. 帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演[J]. *应用生态学报*, 2010(8): 2117—2124. Zhu Gaolong, Ju Weimin, Fan Wenyi, et al. Forest canopy leaf area index in Maoershan Mountain: Ground measurement and remote sensing retrieval[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2117—2124. (in Chinese with English abstract)
- [9] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505—531.
- [10] Running Steven W, Nemani Ramakrishna R, Peterson David L, et al. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation[J]. *Ecology*, 1989, 70(4): 1090—1101.
- [11] Bonan Gordon B. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests[J]. *Remote sensing of Environment*, 1993, 43(3): 303—314.
- [12] Turner David P, Cohen Warren B, Kennedy Robert E, et al. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 52—68.
- [13] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere[J]. *Science*, 1997, 275(5299): 502—509.
- [14] Zhao, Maosheng, Running Steven W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940—943.
- [15] Leuning Ray, Zhang Y Q, Rajaud Amelie, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(10): 1—17.
- [16] Graham A J, Harris R. Extracting biophysical parameters from remotely sensed radar data: a review of the water cloud model[J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27(2): 217—229.
- [17] 周宇宇, 唐世浩, 朱启疆, 等. 长白山自然保护区叶面积指数测量及结果[J]. *资源科学*, 2003, 25(6): 38—42. Zhou Yuyu, Tang Shihao, Zhu Qijiang, et al. Measurement of LAI in changbai mountains nature reserve and its result[J]. *Resources Science*, 2003, 25(6): 38—42. (in Chinese with English abstract)
- [18] 邹杰, 阎广建. 森林冠层地面叶面积指数光学测量方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010(11): 2971—2979. Zou Jie, Yan Guangjian. Optical methods for in situ measuring leaf area index of forest canopy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2971—2979. (in Chinese with English abstract)
- [19] 谭一波, 赵仲辉. 叶面积指数的主要测定方法[J]. *林业调查规划*, 2008, 33(3): 45—48. Tan Yibo, Zhao Zhonghui. The main methods for determining leaf area index[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33(3): 45—48. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王希群, 马履一, 张永福. 北京地区油松, 侧柏人工林叶面积指数变化规律[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1486—1489. Wang Xiqun, Ma Lüyi, Zhang Yongfu. Change patterns of leaf area index (LAI) of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* plantations in Beijing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1486—1489. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 with English abstract)
- [22] 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: 自然科学版*, 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 with English abstract)
- [23] Chen J M, Rich Paul M, Gower Stith T, et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1997, 102(D24): 29429—29443.
- [24] Chen J M, Black T A, Adams R S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 56(1): 129—143.
- [25] Black T A, Chen J M, Lee X, et al. Characteristics of shortwave and longwave irradiances under a Douglas-fir forest stand[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(7): 1020—1028.

Design and applied experiment of long time series leaf area index measuring instrument

Wen Yibo, Fan Wenyi*, Chang Ying, Li Mingze, Yu Hongzhou, Wang Yuhang

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) objectively describes the number of leaves, is a key parameter controlling many biological and physical processes associated with vegetation on the earth's surface, such as photosynthesis, carbon and nutrient cycle, radiative balance, evapotranspiration, and rainfall interception. Thus, LAI is widely used in models of ecology, hydrology, biogeochemistry and climate. Accurately measuring LAI is one of the hotspots in the study of earth science. Long time series LAI is an important input parameter of daily forest carbon and water cycle models, and its accuracy directly influences the result of the model simulation. At present, site measurements of Long time series LAI data expend a large number of repeated manual operations, and produce a great error in the operation. An instrument, with which LAI can be indirectly measured in the field for a long time, was designed in this study. This instrument consisted of solar power system, single-chip microcomputer control system and time control system. The single-chip microcomputer control system was mainly made up of Arduino UNO microcontroller, clock module, storage module, display monitor module steering engine, light intensity sensor, temperature sensor and humidity sensor. In order to prevent the extra light intensity of a single direction that affected the accuracy of measurement, the measuring time was set at 7:00-8:00 and 16:00-17:00 by the time-control system. The solar batteries provided durable electric energy for the instrument. The vertical and horizontal rotary servos were controlled by microcontroller which drove the light sensor to record the light intensity from different solar zenith angles. It can record the light intensity from the zenith angles of 0° , 12° , 24° , 36° , 48° , 60° . Two instruments were used at the same time to measure LAI. One instrument was placed under the forest canopy in a plot to measure light intensity through the canopy, another instrument was placed in some open place, such as forest station, to measure light intensity equivalent to that above canopy. The light transmittance through the canopy was calculated by the ratio of the measured data of the two instruments respectively at different angles. LAI calculation was based on radiation transmission through the canopy. The commercial optical instrument LAI-2200 was used to test and verify the measurement precision of this instrument. LAI was measured on 24 plots, which were set in the experimental forest of Northeast Forestry University. The size was $20 \times 30 \text{ m}^2$. The minimum value of LAI was 1.625, the maximum was 6.323 and an average was 4.21 by using this instrument. The minimum value of LAI was 1.97, the maximum was 6.04 and an average was 3.99 by using LAI-2200. The research showed that the result of Long time series LAI measuring instrument was highly consistent with commercial optical instrument LAI-2200, with R^2 of 0.927, RMSE of 0.36. The cost of the instrument was low, and with such instrument, network measurement would be possible among different forests. The stable operation of the instrument in high humidity environment of the forest was due to its waterproof design. When LAI was measured, the instrument collected data of air temperature and humidity to provide accurate environmental data for the study of long time series LAI changes. All collected data were recorded in the SD card, which was convenient for data application.

Key words: instruments; measurement errors; design; leaf area index; long-term observation; design; single chip microcomputer