

南方人工林叶面积指数的摄影测量

马泽清^{1,2}, 刘琪璟^{1*}, 曾慧卿³, 李轩然^{1,2}, 陈永瑞¹,
林耀明¹, 张时煌¹, 杨风亭¹, 汪宏清¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 利用 CI-110 冠层分析仪、鱼镜头数码照片分析, 结合胸径-叶片半表面模型对干烟洲不同森林类型(20 年生)的叶面积指数进行了测定, 并对 3 种方法进行了比较。共调查 74 块样地。研究对象主要为湿地松 (*Pinus elliottii*) 林、马尾松 (*Pinus massoniana*) 林、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林。针对上述 3 种林型, CI-110 观测值分别为 1.355 (0.38 ~2.85)、1.265 (0.62 ~2.55) 和 2.140 (0.76 ~3.31); 鱼镜头测定值依次为 1.339 (0.71 ~1.79)、1.491 (1.11 ~1.92) 和 1.984 (1.26 ~2.59)。利用胸径-叶片半表面模型测定的叶面积指数(范围)依次为 4.53 (2.24 ~6.34)、3.88 (1.19 ~6.28) 和 6.63 (3.5 ~8.37)。间接仪器法测定的值明显小于实测值, 但具有一定的相关性。胸径-叶片半表面模型测定叶面积指数最为可靠, 而鱼镜头测定法比冠层分析仪测定精度高。

关键词: 叶面积指数; 叶半比表面积; CI-110; 鱼镜头; 干烟洲

文章编号: 1000-0933 (2008) 05-1971-10 中图分类号: Q948; S758.15 文献标识码: A

Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry

MA Ze-Qing^{1,2}, LIU Qi-Jing^{1*}, ZENG Hui-Qing³, LI Xuan-Ran^{1,2}, CHEN Yong-Rui¹, LIN Yao-Ming¹, ZHANG Shi-Huang¹, YANG Feng-Ting¹, WANG Hong-Qing¹

¹ Institute of Geographic Sciences Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China

² The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences Beijing 100085, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (5): 1971 ~1980.

Abstract: Leaf area index (LAI) of three types of forests in the Qianyanzhou of subtropical China was investigated with fisheye photographs and CI-110 canopy analyzer. DBH-leaf area (hemi-surface) regressive model was used for assessing the measurement accuracy by photogrammetry and the canopy analyzer. Field survey was conducted on 74 plots. The values of LAI of for the *Pinus elliottii* forest, the *Pinus massoniana* forest, and the *Cunninghamia lanceolata* forest were 1.339 (0.71 ~1.79), 1.491 (1.11 ~1.92) and 1.984 (1.26 ~2.59) by fisheye photos photogrammetry, 1.355 (0.38 ~2.85),

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划 2002CB4125); 中国科学院资源与环境技术局野外台站基金; 科技部国际合作项目 2006DFB91920

收稿日期: 2007-02-06; 修订日期: 2007-09-17

作者简介: 马泽清 (1983 ~), 甘肃人, 硕士生, 主要从事群落生产力及遥感研究. E-mail: mazing@163.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuqijing@163.com

致谢: 鱼镜头数据处理方法得到陈厦帮助和支持. 野外工作承蒙徐雯佳和刘迎春在采样过程中大力协助. 论文写作过程中得到高彦华、姚彦娟、孙建新帮助, 在此一并致谢.

Foundation item: The project was financially supported by National Key Basic Research Special Foundation of China (No. 2002CB4125)

Received date: 2007-02-06; **Accepted date:** 2007-09-17

Biography: MA Ze-Qing, Master, mainly engaged in community productivity and remote sensing. E-mail: mazing@163.com

1.265 (0.62–2.55) and 2.140 (0.76–3.31) by the CI-110 canopy analyzer, and 4.53 (2.24–6.34), 3.88 (1.19–6.28) and 6.63 (3.5–8.37) by DBH-leaf area model, respectively. Compared with the results by individual-based leaf area model, the two indirect measurement techniques underestimated the LAI, but there are correlations among the three methods. The individual-based model is considered the most reliable approach for estimating leaf area index but labor consuming. Hemispherical photography proved to be more accurate than the CI-110 canopy analyzer for estimating LAI in the planted forests of the subtropical China.

Key Words: LAI; HAS; CI-110; fisheye photography; Qianyanzhou

叶面积指数 (LAI, leaf area index) 是重要的群落学参数, 决定植被获取碳的能力^[1]。LAI 可以解释植被生产力, 是将研究尺度从叶片水平推移到森林冠层时的重要参数^[2], 也是衡量群落结构是否合理的重要指标之一^[3]。

常见的测定叶面积指数的方法主要是直接测量和间接测量^[4–6]。直接测量通过收获植物叶片、使用叶面积仪等求出叶面积。间接测量分为间接接触测量和非接触测量。间接接触测量包括相对生长模型法^[6–8]、边材相关模型法^[9, 10]、凋落叶法^[11, 12]、斜点样方法^[13]和消光系数法^[12]。通常这些方法都要取样, 本文依多数研究惯例将此类方法归为直接测量法。

间接非接触测量主要有顶视法和底视法。顶视法即用传感器从上向下测量, 例如遥感估算法就是基于地物的反射光谱^[14]较大尺度反演 LAI。底视法则是用传感器由下向上测量, 依据冠层辐射传输理论进行测定, 可以作为植物定量遥感的地面定标手段^[15]。底视法测量所需的仪器依据工作原理可以分成两类^[6]: 一类基于对冠层间隙度 (gap fraction) 分析得到叶面积指数, 这类仪器假定冠层内的各种元素 (叶、枝、树干等) 随机分布, 如 CI-110 冠层分析仪、LAI-2000 冠层分析仪等; 另一类基于对冠层间隙大小的分布情况 (gap size distribution) 进行分析得到 LAI, 如 TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies) 和利用半球面影像测量等。WinSCANOPY 和 HemiView 冠层分析仪都是基于彩色半球面影像进行分析的。

鱼镜头法又称半球摄影法 (hemispherical photography), 很早就被用来描述冠层的结构, 定量表示冠层下面微气象辐射、计算林分透光孔隙度 (郁闭度)^[16]等。数码相机的出现促进了这一技术的发展。虽然曝光时由于光学镜头色差失常, 数码彩色照片产生边缘模糊^[17], 但这一方法被认为是间接测量冠层结构的最佳选择^[6]。在过去十年中, 半球照片摄影测量法因计算机技术和数字技术的改进而取得了长足的进步^[18]。最近, 植物指数和集聚指数都能通过鱼镜头摄影法计算出来, 而且不需要用三角架, 从功能上来说兼具 TRAC 和 LAI-2000 的功能, 而价格却较便宜^[19]。

多数间接测量的仪器并不能把叶组织和植物的其他器官区分出来, 不少学者提出了不同的叶面积指数的概念, 包括“植被指数 (VAI)”^[20]、“植物指数 (PAI)”^[21]等。有学者将仪器测算出的叶面积指数统称为有效叶面积指数^[22], 假设叶片随机分布, 通过冠层间隙度来测定。该指数简单易测, 与 NDVI 等植被指数相关性要好于直接测定的 LAI, 是植被冠层固有的属性^[22]。

间接测量方法也不能区分不同树种、年龄叶片的叶面积指数。直接测量法虽耗费的人力物力较多, 但结果可靠^[6], 常用于检验和校准间接测量结果。

新仪器和运算规则的目标是把植物指数等转化成真实叶面积指数^[5]。国际上间接和直接测量叶面积指数对比研究较多^[20, 23, 24]。目前国内地面实测工作大多采用间接测量, 主要仪器有 LAI-2000^[25–27]、TRAC^[28]、CI-110^[29, 30]等, 但大多缺乏直接测量方法校验。不同方法之间缺乏比较研究, 概念和定义缺乏一致性。目前, 国内对于国际上流行的鱼镜头测量叶面积指数方法研究较少。

本文旨在运用多种手段研究亚热带人工林的叶面积指数, 为相关的生物地球化学循环模型提供必要的参数。用 3 种方法对 3 种主要的南方人工林类型湿地松 (*Pinus elliottii*) 林、马尾松 (*Pinus massoniana*) 林、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林进行测量, 探讨方法的同时揭示不同林型叶面积指数在景观尺度的空间格局, 也

为评价该区生态恢复的效果提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

千烟洲试验站位于江西省中部吉泰盆地为南方红壤丘陵区的典型代表(115°04'13"E, 26°44'48"N)。该区海拔多在 100 m 左右, 相对高度 20 ~50 m, 属典型的红壤丘陵区。根据 1985 ~2004 年气象数据总结^①: 试验区年平均气温 17.9 °C; 平均降水量 1489 mm; 年日照时数 1406 h; 太阳年总辐射量 4349 MJ/m²; 具有典型的亚热带季风气候特征。主要土壤类型有红壤、水稻土、潮土、草甸土等, 成土母质多为红色砂岩、砂砾岩^[31]。

试验区以人工林为主, 主要是从 1985 年左右开始栽植, 主要树种有湿地松、杉木、马尾松、樟(*Cinnamomum camphora*)、木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等, 以及桔(*Citrus madurensis*)、橙(*Citrus sinensis*)、板栗(*Castanea mollissima*)、油茶(*Camellia oleifera*)等经济林果植物; 灌丛以白栎(*Quercus fabri*)、櫟木(*Loropetalum chinense*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)分布较广。草本植物以刺芒野古草(*Arundinella setosa*)、山芝麻(*Helicteres angustifolia*)为主。近年以来耐阴蕨类生长十分旺盛, 物种已经超出 20 多种, 如扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、阔鳞鳞毛蕨(*Dryopteris championi*)等^[32]。

1.2 研究方法

1.2.1 原始数据获取

2005 年 7 月至 11 月, 在江西省千烟洲主要的森林类型中共调查有代表性的样地 74 块, 即面积 100 m² 和 400 m² 的样地各 37 块。每块样地拍摄 9 幅照片, 样点位置一般布设在样地中心、对角线 1/4 处等(图 1)。保持相机水平、高度 1 m (桔园和油茶林则取离地面 30 cm 处), 垂直向上拍摄; 将变焦镜头拉至最远拍摄林分全天空照片。拍摄在全阴天进行, 以避免蓝色天空背景影响全天空照片质量。视野范围尽量不收入样地以外的部分。并尽可能在鱼镜头拍摄的相同位置用 CI-110 冠层分析仪测量该样地的叶面积指数。每个样地用两种仪器分别获取 9 个数据。在样地中进行每木检尺, 记录样地的盖度、郁闭度、坡度、坡向等。

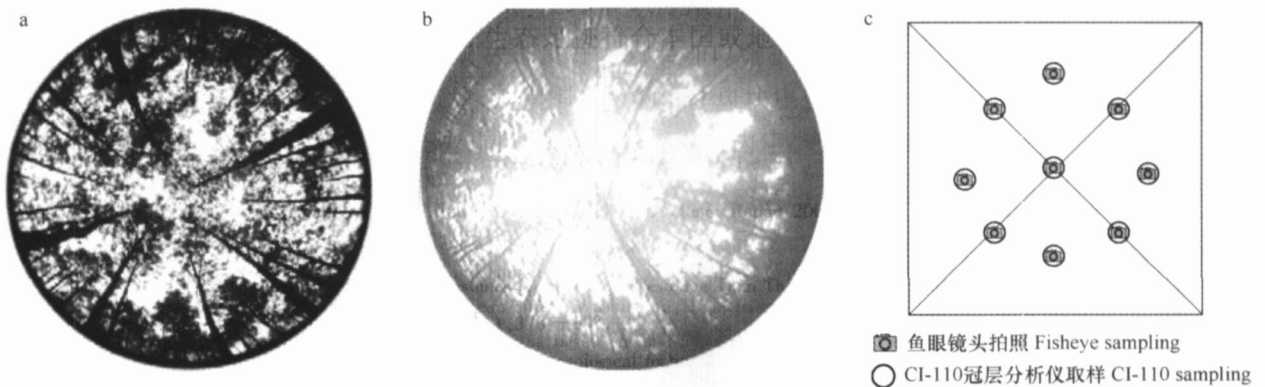


图 1 林冠层照片与取样点布设

Fig. 1 Criterion for sampling photographs of forest canopy

a: 依次为鱼镜头拍摄照片 Fish-eye photos; b: CI-110 冠层分析仪取样照片 CI-110 photos; c: 森林样地取样示意图 Sampling points under canopy

1.2.2 数据处理与分析

本文将间接接触叶面积指数测量法归为实测直接叶面积指数。LAI 定义为单位地面面积上总叶面积的一半(HSA)^[33]。利用试验站最近建立的叶面积回归方程^[7]: 湿地松 $LA = 0.073D^{2.1515}$, 马尾松 $LA =$

① 刘琪璟, 张时煌, 杨风亭, 马泽清. 千烟洲试验站气象要素分布特征综述之一热量及水分条件. 千烟洲生态试验站第四届学术年会论文集, 2006. 97 ~115

$0.060D^{2.1973}$, 杉木 $LA=0.042D^{2.3027}$ (D 为胸径), 计算单木的叶片半表面积 (LA)。利用样地调查数据汇总样地内所有单木的叶片半表面积, 叶面积与样方面积的比值为叶面积指数。

冠层分析仪使用 CI-110^[15, 29]。CI-110 冠层分析仪与 LAI-2000 型冠层分析仪的原理相近。鱼眼探头安装在一个很轻的手柄的顶端, 它可以获取 150° 视角的鱼眼图像。将鱼眼探头放在植物冠层下面时, 保持水平, 高度 1 m, 获取图像。CI-110 利用空隙度函数反演推算叶面积指数。

采用 Minolta DIMAGE7 相机, 采集半球照片。鱼镜头角度为 142.5°。照片处理主要使用两种软件, 一是 Sidelook^①(<http://www.appleco.ch/>), 用来计算图像阈值, 将彩色图片转换成黑白图像; 二是 GLA (Gap Light Analyzer Version 2.0)^②(<http://www.rem.sfu.ca/forestry/index.htm>)。Sidelook 最大的优点是自动确定图像域值^[34]。GLA 需要一个结构包, 主要涉及相机镜头及角度、测点经纬度、坡度、地形等参数, 将照片分成圆环进行分析。GLA 分析结果有: 有效叶面积指数、冠层空隙度和冠层开阔度等。GLA 有效叶面积指数包含两种指数^[35]: LAI_{4R} (4 环) 代表天顶角在 0~60° 之间综合提取的有效叶面积指数 LAI_{5R} (5 环) 代表天顶角在 0~75° 之间综合提取的有效叶面积指数。一般认为 LAI_{4R} 的值较为可靠。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型叶面积指数的测定结果

本研究在 74 个样地分别使用 CI-110 冠层分析仪和鱼镜头数码相机各采集 576 幅图像 (共 1152 幅), 处理结果见表 1、表 2。根据胸径-叶片半表面积模型, 湿地松林、马尾松林和杉木林的实测叶面积指数 (LAI_d)

表 1 千烟洲针叶林叶面积指数测定结果
Table 1 LAI of coniferous forest in Qianyanzhou

林型 Forest types	湿地松林 <i>P. elliotii</i> forest	马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	杉木林 <i>C. lanceolata</i> forest	湿地松-马尾松林 <i>P. massoniana</i> - <i>P. elliotii</i> forest
样地面积 Area (m ²)	100	400	100	400
样地数量 Number of plots	11	16	5	6
胸径 DBH (cm)	16.3	15.9	13.8	13.7
株数 Number of stems	19	58	26	75
密度 Density (株/hm ²)	1580	1458	1956	1863
胸高断面面积 Basal area (m ² /hm ²)	33.15	29.97	30.78	29.56
实测叶面积指数 LAI _d	4.74	4.27	3.90	3.87
CI-110 平均值 Mean LAI _C	1.48	1.27	1.33	1.21
冠层分析仪 最大值 Max LAI _C	2.85	2.62	2.55	2.24
最小值 Min LAI _C	0.70	0.38	0.62	0.62
鱼镜头 4 环平均值 Mean LAI _{4R}	1.32	1.35	1.49	1.49
Fisheyes 4 环最大值 Max LAI _{4R}	1.74	1.79	1.92	1.81
4 环最小值 Min LAI _{4R}	0.71	0.99	1.11	1.25
5 环平均值 Mean LAI _{5R}	1.21	1.21	1.33	1.37
5 环最大值 Max LAI _{5R}	1.60	0.55	1.56	1.59
5 环最小值 Min LAI _{5R}	0.69	0.84	1.13	1.13

LAI_d 表示直接叶面积指数, LAI_C 表示 CI-110 冠层分析仪获取的叶面积指数; LAI_{4R} 和 LAI_{5R} 分别表示鱼镜头 4 环和 5 环综合提取的叶面积指数; 最大值、最小值和平均值根据 9 次取样结果推算 LAI_d is measured value by relative growth model, LAI_C is acquired with CI-110 canopy analyzer; LAI_{4R} and LAI_{5R} are extracted from 4th ring and 5th ring respectively; Maximum, minimum and average are calculated with 9 measurements

① Nobis M. Sidelook 1.1 - 2005 Imaging Software for the Analysis of Vegetation and Structure with True-Colour Photographs

② Frazer G W, Canham C D, Lertzman K P. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0; Imaging, Software to Extract Canopy Structure and Gap Light Transmission Indices from True-Colour Fisheye Users Manual and Program Documentation. Copyright? 1999; Simon Fraser University Photographs and British Columbia Burnaby and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York, 1999

(范围)分别为 4.53 (2.24 ~6.34)、3.88 (1.19 ~6.28) 和 6.63 (3.5 ~8.37), 高于广东鹤山的湿地松林 (3.94) 和马尾松林 (3.47)^[35], 低于广东省鼎湖山用斜点 (倾角 32.5 度) 样方法测定的马尾松群落 (8.8)^[13]。马尾松林的结果小于浙江省西部马尾松幼龄林^[36] ($DBH=10\text{ cm}$, $5.4 < LAI < 8.31$)。湿地松-马尾松混交林的叶面积指数为 3.69。

表 2 千烟洲其他林型叶面积指数测定结果

Table 2 LAI of other forests in Qianyanzhou

林型 ^① Forest types	桔林	阔叶林	木荷林	针阔林	板栗林	油茶林	天然 马尾松林	灌木林
样地面积 Area (m ²)	100	400	400	400	400	100	100	100
样地数量 Number of plots	6	2	3	1	4	2	2	1
胸径 DBH (cm)	12.0	12.9	11.0	13.7	13.0	15.3	10.9	31.3
株数 Number of plants	18	52	67	73	80	56	23	2
密度 Density (株/hm ²)	1 767	1 300	1 683	1 825	1 994	1 400	2 300	200
胸高断面面积 Basal area (m ² /hm ²)	21.01	17.62	20.17	28.04	28.15	24.72	22.87	14.99
实测叶面积指数 LAI _d				2.92 ^②			1.97	2.31
CF-110 平均值 Mean LAI _C	2.23	2.16	1.47	1.40	1.79	1.39	0.65	1.67
冠层分析仪 最大值 Max LAI _C	3.14	2.62	2.28	1.96	3.78	1.70	0.87	2.09
最小值 Min LAI _C	1.43	1.74	0.91	0.96	0.62	1.19	0.46	1.29
鱼镜头 4 环平均值 Mean LAI _{4R}	2.27	2.51	2.05	2.25	1.62	2.12	1.46	2.36
Fisheyes 4 环最大值 Max LAI _{4R}	3.26	3.16	2.71	2.51	2.14	2.24	2.33	2.78
4 环最小值 Min LAI _{4R}	1.36	1.73	1.31	2.15	0.93	2.01	0.80	1.76
5 环平均值 Mean LAI _{5R}	1.95	2.13	1.75	1.93	1.45	1.76	1.27	2.03
5 环最大值 Max LAI _{5R}	2.64	2.64	2.24	2.05	1.93	1.84	1.91	2.51
5 环最小值 Min LAI _{5R}	1.27	1.49	1.20	1.82	0.83	1.66	0.06	1.64

①桔林 *C. reticulata* forest, 阔叶林 Broad-leaved forest, 木荷林 *S. superba* forest, 针阔混交林 broad leaved-conifer mixed forest, 板栗林 *Castanea mollissima* forest, 油茶林 *Camellia oleifera* forest, 天然马尾松林 Natural *P. massoniana* forest, 灌木林 Shrub forest, CF-110 冠层分析仪 CF-110 canopy analyzer; ②表示针阔混交林中针叶树种叶面积指数 The LAI of needle forest in broad leaved-conifer mixed forest

CF-110 冠层分析仪测得湿地松林、马尾松林、杉木林、马尾松-湿地松混交林叶面积指数 (LAI_C) 分别为 1.355 (0.38 ~2.85)、1.265 (0.62 ~2.55)、2.140 (0.76 ~3.31) 和 1.002 (0.65 ~1.61)。该值小于 2002 年用 CF-110 测定的结果: 湿地松 2.40 (1.37 ~3.78), 马尾松 2.00 (1.28 ~2.62), 杉木 2.94 (1.68 ~3.96)^[29]。

利用鱼镜头拍摄的数码照片经 GLA 软件分析得到湿地松林、马尾松林、杉木林、马尾松与湿地松林 LAI_{4R} 分别为: 1.339 (0.71 ~1.79)、1.491 (1.11 ~1.92)、1.984 (1.26 ~2.59) 和 1.318 (1.05 ~1.53), LAI_{5R} 分别为 1.208 (0.69 ~1.55)、1.348 (1.13 ~1.59)、1.774 (1.48 ~2.14) 和 1.215 (0.97 ~1.41)。

桔林的叶面积指数较大, 平均在 2.25 左右。叶面积指数最大值 (3.78) 出现在针阔混交林, 由 CF-110 测得。油茶林 CF-110 测定值偏小。灌木林测定结果较大, 主要因为该灌木林为封育地, 植被长势茂密, 盖度和郁闭度较大。冠层高度也有一定影响。

两种仪器测定叶面积指数的结果较为接近。以湿地松林为例, 相差只有 8.1%。用树木叶生物量模型与叶片半比表面积, 计算值与仪器值差别较大, 误差范围在 54.3% ~70.5%, 其中湿地松林误差最大, 杉木林误差最小。仪器法测定值明显偏小, 实际叶面积指数为有效叶面积指数的 3 倍以上。针叶林产生误差最主要原因被认为是针叶的集聚效应^[37]; 另外, 当叶面积指数达到 5 之后, 冠层已经趋于饱和, 间接仪器低估了叶面积指数^[4]。通常间接测定的叶面积指数与直接测定的指数误差可能在 25% ~50%^[4, 37], 而本项研究中误差偏大, 原因之一在于选取了半表面积 LAI 这个定义, 如果采用投影叶面积指数可能误差范围要小一些。

①天然马尾松林多为次生阔叶灌丛, 少量残留马尾松散生, 盖度以灌木为优势

CI-110 冠层分析结果总体上大于鱼镜头分析结果,且变化幅度较大。取样面积对叶面积指数影响较大。如果样地面积较小,分析的结果要略小一些。

通过不同方法测定的叶面积指数相关性分析:实测叶面积指数与鱼镜头4环最小值相关性最高。鱼镜头测定的 LAI 之间普遍有较好的相关性,在一定程度上,鱼镜头测定方法要优于 CI-110 冠层分析仪。鱼镜头与 CI-110 相关性较好,相关系数均大于 0.5,这两种仪器的测定值具有一定的可比性。实测叶面积指数与仪器测定的有效叶面积指数有一定的相关性,相关系数大约在 0.3 ~0.5 之间。

2.3 不同方法间比较

2.3.1 两种间接法测量仪器比较

鱼镜头数据与 CI-110 数据之间存在一定的相关性(图 2),判定系数 (R^2) 达 0.378。针叶树种集中在图左下方,杉木和阔叶树种集中在图右上方。阔叶树种分布较为分散。针叶树种,尤其马尾松主要分布在 LAI_{4R} 为 1.5 的范围,而且这段 CI-110 测定值较低。CI-110 测定针阔混交林值较大。桔林大多位于趋势线,说明间接仪器法测定阔叶林比针叶林准确。

阔叶林 LAI_C 与 LAI_{4R} 的判定系数要低于针叶林(图 3、图 4),但阔叶林的散点都位于 $Y=X$ 这条线上,也说明这两种仪器测定的结果非常接近。而针叶林由于集聚效应等其他因素,点的范围较为集中,鱼镜头测定结果也略微高一些,CI-110 结果和鱼镜头结果总体平均值的比值为 0.981,但进一步分析发现面积为 100 m² 的样地该比值为 0.894,面积 400 m² 的样地该比值为 1.073。取样面积较小,鱼镜头的测定结果较大;取样面积较大,CI-110 的测定结果略偏大。

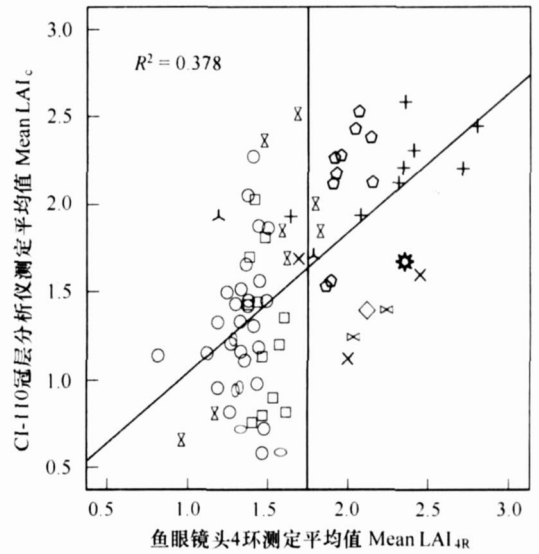
2.3.2 直接测量实测值与间接值测量比较

通过实测叶面积指数 (LAI_d) 与其他 3 种 LAI 测定结果对比(图 5):鱼镜头摄影测量法的效果优于 CI-110 冠层分析仪,鱼镜头四环测定结果要比五环的略好一些,鱼镜头的五环的值比四环的值略大一些。针叶植物的叶片在空间的排列并不是随机的。前面假设中的光线透过率在针叶冠层中测量时会比实际值要小。因为 CI-110 等仪器假设叶片的位置是随机的,所以在针叶冠层中测得 LAI 值会偏低。

为了便于以后顺利校准仪器误差,根据实际测算值(直接叶面积指数)与仪器之间拟合了经验模型(表 3)。通过比较,鱼镜头 4 环的值与实测值的相关性最好。

3 讨论

本文通过实验,比较了几种测定叶面积指数的方法。根据胸径叶片半表面积 (HSA) 模型,湿地松林、马尾松林和杉木林的实测叶面积指数(范围)分别为 4.53、3.88 和 6.63;CI-110 观测值依次为 1.355、1.265 和 2.140;鱼镜头测定值依次为:1.339、1.491 和 1.984。间接仪器法测定值明显小于实测值,说明针对特定的群落类型,冠层分析仪需要进行校准。用于间接测量的以不同原理为基础的两种光学仪器所测定的叶面积指数具有一定的相关性,判定系数 (R^2) 可达 0.378。鱼镜头摄影分析法优于 CI-110 冠层分析法,具有较大的发展潜力。



- 林型 Forest types
- ◇ 板栗林 *Castanea mollissima* forest
 - ✱ 灌丛 Shrub forest
 - + 桔林 *C. reticulata* forest
 - × 阔叶混交林 Broadleaved forest
 - ⊗ 针阔混交林 Broad leaved-conifer mixed forest
 - 马尾松-湿地松混交林 *P. massoniana*-*P. elliotii* forest
 - 马尾松林 *P. massoniana* forest
 - ∞ 木荷林 *S. superba* forest
 - 杉木林 *C. lanceolata* forest
 - 湿地松林 *P. elliotii* forest
 - 人 天然马尾松林 Natural *P. massoniana* forest
 - 油茶林 *Camellia oleifera* forest

图 2 鱼镜头与 CI-110 冠层分析仪测量结果比较
Fig. 2 Comparison of LAI by fish-eye lens and by CI-110 canopy analyzer

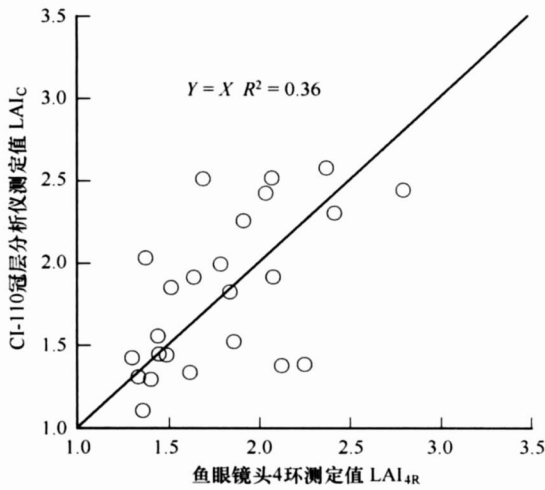


图3 阔叶林 CI-110 冠层分析仪测定值与鱼镜头 4 环测定值散点图
Fig. 3 Scatter plot: relationship between LAI_{4R} and LAI_C in broad-leaved forest

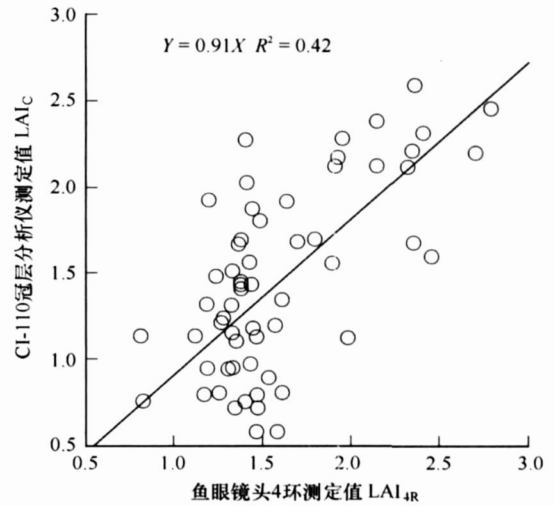


图4 针叶林 CI-110 冠层分析仪测定值与鱼镜头 4 环测定值散点图
Fig. 4 Scatter plot: relationship between LAI_{4R} and LAI_C in coniferous forest

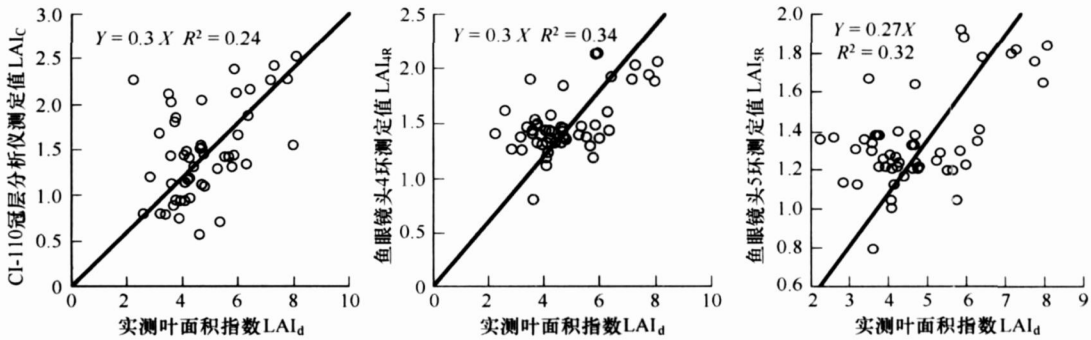


图5 不同方法测定针叶林叶面积指数相关散点图
Fig. 5 Scatter plot showing the accordance of LAI in coniferous forest by different methods

表3 直接测量值 LAI_d (实测值) 的与间接测量 LAI 回归模型

Table 3 LAI Regression models between direct and indirect measurements

项目 Item	判定系数 R ²	F 值 F	显著性 Sig.	回归模型 Regressive model
CI-110 冠层分析仪 CI-110 canopy analyzer	0.256	5.496	0.003	LAI _d = 2.972 + 2.383 Mean - 0.806 Max - 0.184 Min
鱼镜头 4 环 Fisheye 4Ring	0.483	14.947	0.000	LAI _d = 1.675 + 1.529 Mean - 3.3228 Max + 4.894 Min
鱼镜头 5 环 Fisheye 5Ring	0.443	12.748	0.000	LAI _d = 1.511 + 0.051 Mean - 2.7483 Max + 5.9152 Min

所有仪器测定 LAI 都基于光传输理论并假设叶为随机分布^[4]。针叶树叶片具有很强的集聚性, LAI 的绝对误差会很大, 解决办法是看其相对差或以直接测量来校正仪器测定结果。本文利用相对生长模型直接测量的方法对两种仪器进行了校准, 并对两种方法进行了比较。同时利用鱼镜头摄影 (Fisheye photography) 分析法, 总结了一套较为可靠的操作步骤。利用 Sidelook 软件人机交互提取阈值, 减少了主观误差, 具有可重复性和可比性^[34]。

间接测量方便、快捷, 但由于仪器测定的有效叶面积指数没有剔除树干、树枝等部分, 其测量结果的准确性一直受到质疑。使用胸径-叶片半表面积模型直接测量法, 位于样方边缘单木的树冠溢出了样方, 测定的结

果也可能略偏大;但这种方法依据林分现况和单木的相对生长模型,无需任何假设,最符合森林冠层结构,因而较为可靠。

取样面积和取样频率对叶面积指数有重要影响。CI-110 结果与鱼镜头分析结果在样地面积 100 m^2 、 400 m^2 相关系数 (R) 分别为 0.74、0.59。从生态学的角度来说(直接测量法),乔木样地设置为 $20 \times 20\text{ m}$ 较为合适,这样林分密度、径阶分布合理;而从间接测定叶面积指数来讲,样地大小设置为 $10 \times 10\text{ m}$ 较为妥当,因为取样频率高,避免了因林分异质而产生的系统误差。对湿地松林取样达 27 个,发现 100 m^2 和 400 m^2 样地的两组数据值较为接近,大量取样避免了摄影测量的随机性,充分说明摄影测量法必须高频重复取样。

由于取样数量大,野外调查周期长达 4 个月,对 13 个样地分别在 8 月初和 11 月份进行了两次测定,发现 LAI_{4R} 和 LAI_C 分别减少了 0.225 和 0.256。这部分减少的叶面积指数只占乔木直接叶面积指数的 5.56%。直接测定法和间接测定法对比时没有考虑叶面积指数的季节变化。鱼镜头和 CI-110 冠层分析仪同步取样,二者之间具有很强的可比性。直接叶面积指数以胸径的增长幅度为依据,而这种方法往往使结果偏高。间接摄影测量结果减小主要是受到落叶灌木的影响,而对乔木叶面积指数影响不大。叶面积指数的季节变化需要长期定位观测研究。

3 种方法测定结果的变化趋势一致,鱼镜头法测定值较为稳定。目前,大量的研究已经证实鱼镜头摄影分析法最具潜力^[38]。有学者^[6]推荐使用这种方法。但最新的研究^[39]表明 TRAC 与 LI-2000 要比半球摄影法更可靠一些。如果处理过程中确定合适的天顶角范围,就能较为准确和快速的测量出叶面积指数和集聚指数,所以也建议使用这种方法,但使用的软件与本研究不同。

在使用两种仪器的过程中,天气晴朗或天空过阴暗都会产生较大的误差^[17]。光线太强值偏小,光线昏暗值偏大。因而应选择天空漫反射较强的多云天气或清晨。

本文没有讨论间接测量仪器的原理,国内外较多文献已经详细说明^[15, 17, 19, 26, 28]。从野外工作的实际出发,大量采集半球照片不适于使用三脚架,而且,目前几乎所有的冠层分析仪都不具备调整水平的功能。最新研究报道,即便不使用三脚架也能保证精度要求^[19]。为了减少系统误差,建议数码相机不使用自动曝光。用探头(CI-110;LI-2000)采集图像时,操作过程中很难保持水平,需要进一步改进仪器。

冠层分析仪等间接仪器测量需要以直接测量法进行校正。胸径-叶面积模型法是较为可靠且合乎生态学规律的测定方法,但是耗时费力。鱼镜头摄影法比冠层分析仪具有较强的灵活性,而且测定的结果也比较可靠。

References

- [1] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York: Springer-Verlag Inc, 2002.
- [2] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modeling* 1988, 42: 125 - 154.
- [3] Zhang L, Luo T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28 (6), 844 - 852.
- [4] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fapar, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 1999, 70 (1): 29 - 51.
- [5] Breda Nathalie J J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54 (392): 2403 - 2717.
- [6] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, *et al.* Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121 (12): 19 - 35.
- [7] Li X R, Liu Q J, Cai Z, *et al.* Specific leaf area and leaf area index of conifer plantation in Qianyanzhou station of subtropical China. *Journal of Plant Ecology* 2007, 31 (1), 93 - 101.
- [8] Li X R, Liu Q J, Cai Z, *et al.* Leaf area index measurement of *Pinus elliotii* plantation. *Acta Ecologica Sinica* 2006, 26 (12), 4099 - 4105.
- [9] Shelburne V B, Hedden L, Allen R M. The effects of site, stand density, and sapwood permeability on the relationship between leaf area and sapwood area in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Forest Ecology and Management*, 1993, 58 (3-4): 193 - 209.

- [10] Vertessy R A, Benyon R G, O'sullivan S K, *et al.* Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology*, 1995, 15: 559 - 567.
- [11] Chen X D. The collect deciduous leaves method for measurement leaf area index. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 1990, 15 (2): 280 - 282.
- [12] Ren H, Peng S L. Comparison of methods of estimation leaf area index in Dinhuashan forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17 (2): 220 - 223.
- [13] Ren H, Peng S L, Lu J. Study on the measurement of leaf-area index of lower-subtropical forest inclined point quadrates method. *Journal of Hubei Institute of Education (Natural Science Edition)*, 1994, (4): 66 - 70.
- [14] Wulder M A, Le Drew E F, Franklin S E, *et al.* Aerial image texture information in the estimation of the northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64: 64 - 76.
- [15] Zhang R H, Sun X M, Zhu Z L. A speedier measuring technology for leaf area index——a calibration tool in quantitative remote sensing of vegetation. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1998, 35: 54 - 61.
- [16] Zhu J J. Method for measurement of optical stratification porosity (OSP) and its application in studies of management for secondary forests. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1229 - 1233.
- [17] Frazer G W, Fournier R A, Trofymow J A, *et al.* A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 249 - 263.
- [18] Beaudet M, Messier C. Variation in canopy openness and light transmission following selection cutting in northern hardwood stands; an assessment based on hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110: 217 - 228.
- [19] Leblanc S G, Chen J M, Fernandes R, *et al.* Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129: 187 - 207.
- [20] Fassnacht K S, Gower S T, Norman J M. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 71: 183 - 207.
- [21] Neumann H H, Denhartog G R, Shaw H. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 45 (3 - 4): 325 - 345.
- [22] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55: 153 - 162.
- [23] Chason J W, Baldocchi D D, Huston M A. Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 57: 107 - 128.
- [24] Rhoads A G, Hamburg S P, Fahey T J, *et al.* Comparing direct and indirect methods of assessing canopy structure in a northern hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34: 584 - 591.
- [25] Tian Q J, Jin Z Y. Research on calculation and spatial scaling of forest leaf area index from remote sensing image. *Remote Sensing Information*, 2006, 4: 5 - 11.
- [26] Wu T, Ni S X, Li Y M, *et al.* A comparison on the algorithms for retrieval of LAI based on gap fraction of vegetation canopy. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 29 (1): 111 - 115.
- [27] Li K L, Jiang J J, Mao R Z. The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (6): 1491 - 1495.
- [28] Zhou Y Y, Tang S H, Zhu Q J, *et al.* Measurement of LAI in Changbai Mountains Nature Reserve and its result. *Resources Science*, 2003, 25 (6): 38 - 42.
- [29] Zhang H Q, Chen Y R, Niu D. Retrieving effective leaf area index of conifer forests using Landsat TM images in red soil hilly region. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26 (2): 159 - 163.
- [30] Xi J C, Zhang H Q, Zhang Z Q. Retrieving effective leaf area index of conifer forests using Landsat TM images. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 12 (3): 253 - 257.
- [31] Scientific Investigation Team of Chinese Academy of Sciences for Southern Mountainous Areas. Management office of natural resources in Ji'an Prefecture of Jiangxi Province. Management and Development of Red Hilly Area Experimental Study in Qianyanzhou. Beijing: Science Press, 1989.
- [32] Liu Q J, Hu L L, Li X R. Plant diversity in Qianyanzhou after 20 years of small watershed treatment. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (5): 766 - 774.
- [33] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant Cell and Environment*, 1992, 15 (4): 421 - 429.
- [34] Nobis M, Hunziker U. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128: 243 - 250.

- [35] Zhang T P, Ren H, Peng S L, *et al.* The ecological and biological characteristics of *Pinus elliottii*. *Ecologica Science*, 1999, 18 (2): 8-11.
- [36] Wu H G, Qiao Y Y, Yan X J, *et al.* Green biomass and leaf area index of young Masson pine forest in western Zhejiang mountains. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1995, 12 (3): 253-257.
- [37] Gardinen P R, Jackson G E, Hernandez-Daumas S, *et al.* Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94: 243-257.
- [38] White M A, Asner G P, Nemani R R, *et al.* Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems: digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 45-57.
- [39] Chen J M, Govind A, Somentag O, *et al.* Leaf area index measurements at Flux net-Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 40 (1-4): 257-268.

参考文献:

- [3] 张林, 罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展. *植物生态学报*, 2004, 28 (6): 844-852.
- [7] 李轩然, 刘琪璟, 蔡哲, 等. 千烟洲针叶林的比叶面积和叶面积指数. *植物生态学报*, 2007, 31 (1): 93-101.
- [8] 李轩然, 刘琪璟, 蔡哲, 等. 湿地松叶面积指数的测算. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4099-4105.
- [11] 陈晓德. 收集落叶法测定叶面积指数. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1990, 15 (2): 280-282.
- [12] 任海, 彭少麟. 鼎湖山森林群落的几种叶面积指数测定方法的比较. *生态学报*, 1997, 17 (2): 220-223.
- [13] 任海, 彭少麟, 卢军. 南亚热带森林群落的叶面积指数测定 II. 斜点样方法. *湖北教育学院学报(自然科学版)*, 1994, (4): 66-70.
- [15] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林. 叶面积指数的快速测定方法-植被定量遥感的标定技术. *国土资源遥感*, 1998, 35: 54-61.
- [16] 朱教君. 透光分层疏透度测定及其在次生林结构研究中的应用. *应用生态学报*, 2003, 14 (8): 1229-1233.
- [25] 田庆久, 金震宇. 森林叶面积指数遥感反演与空间尺度转换研究. *遥感信息*, 2006, 4: 5-11.
- [26] 吴彤, 倪绍祥, 李云梅, 等. 由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较. *南京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 29 (1): 111-115.
- [27] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等. 植被叶面积指数遥感监测模型. *生态学报*, 2005, 25 (6): 1491-1495.
- [28] 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. *资源科学*, 2003, 25 (6): 38-42.
- [29] 张红旗, 陈永瑞, 牛栋. 红壤丘陵区针叶林有效叶面积指数遥感反演模型. *江西农业大学学报*, 2004, 26 (2): 159-163.
- [30] 席建超, 张红旗, 张志强. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数. *北京林业大学学报*, 2004, 26 (6): 36-39.
- [31] 中国科学院南方山区综合科学考察队, 江西省吉安地区自然资源开发治理办公室. 红壤丘陵开发和治理——千烟洲综合开发治理试验研究. 北京: 科学出版社, 1989.
- [32] 刘琪璟, 胡理乐, 李轩然. 小流域治理20年后的千烟洲植物多样性. *植物生态学报*, 2005, 29 (5): 766-774.
- [35] 张太平, 任海, 彭少麟, 等. 湿地松 (*Pinus elliottii*) 的生态生物学特征. *生态科学*, 1999, 18 (2): 8-11.
- [36] 武红敏, 乔彦友, 严小君, 等. 浙西山地马尾松幼龄林的绿色生物量和叶面积指数. *浙江林学院学报*, 1995, 12 (3): 253-257.