

DOI: 10.5846/stxb202106111562

谢贤胜, 卢峰, 杨元征, 罗蔚生, 徐占勇, 苏宏新. 广西桉树人工林叶面积指数的估测及其校正. 生态学报, 2022, 42(11): 4451-4462.

Xie X S, Lu F, Yang Y Z, Luo W S, Xu Z Y, Su H X. Leaf area index estimation and correction of *Eucalyptus* plantation in Guangxi Autonomous Region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4451-4462.

广西桉树人工林叶面积指数的估测及其校正

谢贤胜¹, 卢峰³, 杨元征¹, 罗蔚生³, 徐占勇³, 苏宏新^{1,2,*}

1 广西地表过程与智能模拟重点实验室(南宁师范大学), 南宁 530001

2 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

3 广西壮族自治区森林资源与生态环境监测中心, 南宁 530028

摘要: 叶面积指数(Leaf area index, LAI)是森林生态系统重要的结构参数,通过遥感技术可反演区域 LAI,但其可靠性需要地面准确的实测数据进行验证。选取广西国有高峰林场不同林龄的桉树(*Eucalyptus robusta*)人工林为对象,以异速生长法(Allometry)为对照,综合利用植物冠层分析仪法(LAI-2200)、跟踪辐射和冠层结构分析仪法(TRAC)、半球摄影法(DHP)以及地基激光雷达法(TLS)等间接法估测样地的 LAI,并考虑木质成分以及聚集效应影响,进行相应的校正处理,为地面快速、准确测量桉树人工林 LAI 提供参考。结果表明:桉树人工林的比叶面积为 $125.37 \pm 13.38 \text{ cm}^2/\text{g}$,通过 Allometry 获得的 LAI 变化范围在 1.65—3.84,平均为 2.73,不同林龄间的差异均显著($P < 0.05$),随着林龄的增加呈现先增加后减少的趋势。在未校正情况下, LAI-2200、TRAC、DHP、TLS 估算的 LAI 存在显著差异($P < 0.05$)。与对照相比, LAI-2200 在幼龄林和过熟林中估算误差最小, TRAC 在成熟林中估算误差最小。相对于完全去除法,利用 PS 仿制法校正桉树人工林的木质部影响更为合理,木质比例在 0.33%—25.95%,聚集指数在 0.63—1.00,两者对间接法估测 LAI 的影响程度相当。

关键词: 有效叶面积指数;真实叶面积指数;桉树人工林;传统光学仪器;地基激光雷达

Leaf area index estimation and correction of *Eucalyptus* plantation in Guangxi Autonomous Region

XIE Xiansheng¹, LU Feng³, YANG Yuanzheng¹, LUO Weisheng³, XU Zhanyong³, SU Hongxin^{1,2,*}

1 Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

3 Guangxi the Forest Resources and Environment Monitoring Center, Nanning 530028, China

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important structural parameter of forest ecosystem, and the regional LAI can be retrieved through remote sensing technology. However, due to the complexity of forest structure and the heterogeneity of ground features, its reliability needs to be verified by accurately measured data on the ground. Using *Eucalyptus* plantation of different ages in the Guangxi State-owned Gaofeng Forest Farm as the object and the Allometry method as the control, this study uses indirect methods such as LAI-2200 plant canopy analyzer (LAI-2200), tracing radiation and architecture of canopies (TRAC), digital hemispherical photography (DHP), and terrestrial laser scanning (TLS) to estimate the LAI of the sample plots. The study also takes into account the influence of wood elements and clumping effect to conduct corresponding correction treatment, which provides a reference for the quick and accurate measurement of the LAI of *Eucalyptus* plantation on the ground. The results showed that the specific leaf area of *Eucalyptus* plantation was $125.37 \pm 13.38 \text{ cm}^2/\text{g}$, and the LAI obtained by the Allometry method ranged from 1.65 to 3.84, with an average of 2.73.

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0500103, 2017YFD0600901-4)

收稿日期:2021-06-11; 网络出版日期:2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hxsu@nnnu.edu.cn

The differences between different forest ages were significant ($P < 0.05$), showing a trend of first increasing and then decreasing as the forest age increased. Without correction, there were significant differences in the LAI estimated by LAI-2200, TRAC, DHP, and TLS ($P < 0.05$). Compared with the control, LAI-2200 had the smallest estimation error in young and over-mature forests, and TRAC had the smallest estimation error in mature forests. LAI was generally underestimated by different indirect methods. Without considering the correction, the LAI-2200 is the most suitable choice, which can obtain accurate LAI. It is necessary to further consider automatic exposure problems during measurement of LAI by DHP. For TLS, it is necessary to further consider the inversion model according to the forest stand environment and use airborne laser scanning (ALS) to appropriately supplement the point cloud data above the canopy to improve the accuracy of the inversion. Compared with the complete removal method, it is more reasonable to use the PS imitation method to correct the wood's influence in *Eucalyptus* plantation. The woody-to-total area ratio is between 0.33% and 25.95%, and the clumping index is between 0.63 and 1.00. Both have the same degree of impact on the estimation of LAI by the indirect methods. It is found that the correction effect is not obvious. Because there is an offsetting role in the removal of wood elements and clumping effect.

Key Words: effective leaf area index; true leaf area index; eucalyptus plantation; traditional optical instruments; terrestrial laser scanning

作为森林生态系统重要结构参数,叶面积指数(Leaf area index, LAI)通常被定义为单位土地面积上的总叶表面积的一半,常用于模拟森林雨水拦截、光合作用、呼吸作用与蒸腾作用等方面,对量化森林生态系统生产力与生态过程具有重要意义^[1-2]。由于森林结构的复杂性和地物信息的非均一性,通过遥感技术获得的 LAI,需要地面提供准确的实测数据进行验证^[3]。目前,地面 LAI 测量方法主要分为直接法和间接法。直接法通过比叶面积(Specific leaf area, SLA)结合生物量来估算 LAI,通常包括凋落物收集法、异速生长法(Allometry)和破坏性取样法^[4]。间接法主要通过传统光学仪器或地基激光雷达技术估算 LAI^[5]。基于辐射的光学仪器,如植物冠层分析仪(Plant canopy analyzer, LAI-2200)、跟踪辐射和冠层结构分析仪(Tracing radiation and architecture of canopies, TRAC)通常假定林冠叶子是随机分布,但现实中往往会存在聚集现象;基于图像的光学仪器,如数码相机+鱼镜头的半球摄影法(Digital hemispherical photography, DHP)测量结果往往会包含树干、树枝等木质部贡献^[6-7]。地基激光雷达(Terrestrial laser scanning, TLS)利用海量三维点云数据重建林冠结构,通过间隙率反演 LAI,同样受到聚集效应和木质部影响^[8]。

为去除上述因素干扰,常用木质比例(木质部面积与总面积之比)和聚集指数进行量化^[9-10]。木质比例可通过破坏性采集法、背景值法、PS 法获取^[11]。聚集指数主要包括 Ω_{LX} (基于冠层孔隙度)、 Ω_{CC} (基于冠层空隙大小)、 Ω_{CLX} (联合 Ω_{LX} 和 Ω_{CC})、 Ω_{LXC} (基于有序加权平均的冠层孔隙度)等算法,可通过冠层半球图像或点云数据获取^[12]。近年来,不少学者利用木质比例和聚集指数校正了间接法的测量结果。例如,苏宏新等^[13]通过背景值法、刘志理和金光泽^[10]通过 PS 法获取木质比例,发现 LAI-2000 和 DHP 校正后的结果与凋落物法呈现显著的相关性,测量精度得以提高。周明等^[7]以凋落物法为对照,分别考虑了无叶期木质部全部、木质部中的树干成分、树干成分在有效 LAI 占比等情况,发现考虑第三种情况用于木质部校正更为合理。Zhu 等^[14]分别基于几何特征和 Ω_{CC} 算法从点云数据中提取出木质比例和聚集指数,发现其对 TLS 的校正效果优于 DHP。Zou 等^[15]对比了破坏性采集法和背景值法对获取木质比例的效果差异,发现利用后者进行 LAI 校正时会存在较大程度的低估;同时,还基于 Ω_{CC} 、 Ω_{LX} 、 Ω_{CLX} 三种算法从半球图像中提取聚集指数,发现 Ω_{LX} 和 Ω_{CLX} 算法更适用于校正 DHP。上述研究虽对不同间接法进行了有益的校正尝试,但主要以温带、寒温带的典型森林为研究对象,对南方亚热带常绿阔叶林研究较少,其适用性和有效性仍需进一步验证。

桉树(*Eucalyptus robusta*)是桃金娘科(Myrtaceae)桉树属(*Eucalyptus*)植物,属于典型的常绿阔叶乔木^[16],我国桉树引种地区主要在海南、广西、广东、福建等省份。截至 2018 年,广西桉树人工林面积达到 266.67×

10^4 hm^2 ,其种植面积和产量居全国首位,在保障木材供给和改善生态环境方面发挥着巨大作用^[17]。对于我国桉树的相关研究,主要集中于林冠结构^[18]、凋落物及养分^[19]、生物量及碳储量^[20]方面,对于桉树林的 LAI 研究相对较少。部分学者已利用传统光学仪器对广西国营东门林场^[21]、广东湛江^[22]、广西公净水库^[23]、广西都安^[24]等地的桉树林分 LAI 进行测定,但测定结果均未考虑木质部和聚集效应的影响。本研究选取广西国有高峰林场不同林龄(幼龄林、成熟林和过熟林)的桉树人工林为对象,以 Allometry 为对照,综合利用 LAI-2200、TRAC、DHP 和 TLS 估测样地的 LAI,并考虑木质成分以及聚集效应影响,进行相应的校正处理,以期提高地面桉树人工林 LAI 测量的准确性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究实验样地位于广西国有高峰林场($22^{\circ}49' - 23^{\circ}15' \text{N}$, $108^{\circ}8' - 108^{\circ}53' \text{E}$)内,地处广西南宁市西部(图 1)。该区域属亚热带季风气候,雨水充沛、气候温和、阳光充足、干湿分明。根据距离最近的南宁市国家气象观测站($22^{\circ}38' \text{N}$, $108^{\circ}13' \text{E}$, 海拔 121.6 m) 1961—2020 年的观测数据显示,年平均最低气温为(18.6 ± 1.2) $^{\circ}\text{C}$,年平均最高气温为(26.4 ± 1.5) $^{\circ}\text{C}$,年平均气温为(21.7 ± 1.2) $^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为(1303.6 ± 63.9) mm,年平均相对湿度为 $79.1\% \pm 4.2\%$,年平均日照百分率为 $36.0\% \pm 10.2\%$ 。广西国有高峰林场主要以丘陵地形为主,海拔高度在 100—200 m,坡度一般为 $10^{\circ} - 30^{\circ}$,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。由于长期人类活动,目前以人工林为主,主要树种有桉树、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等,森林覆盖率高达 87%。

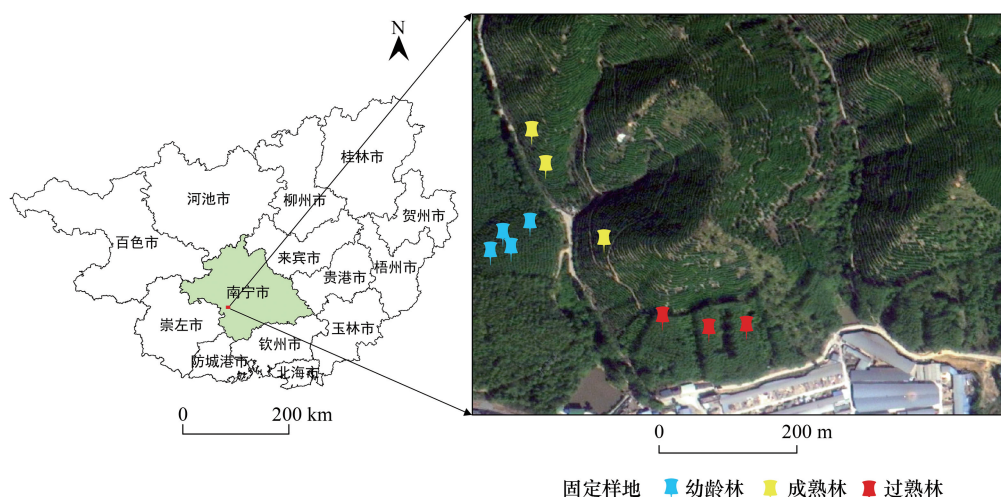


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of study area

1.2 样地设定

采用典型样地法。选取广西国有高峰林场内林相完整、不同林龄的桉树人工林设置固定样地 10 块(图 1,表 1),并进一步划分 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的二级小样方。以小样方为调查单元,对样方内林木进行每木检尺,记录物种名、胸径、树高等信息。同时记录样地相应的经纬度、海拔、坡度与坡向。

1.3 LAI 测定方法

本研究所有 LAI 测定的野外数据采集时间为 2020 年 8 月中下旬,正值夏季,是林木生长最为旺盛时期,叶子已经完全伸展。

1.3.1 异速生长法

比叶面积测定:首先,分别对 10 块样地的叶片进行取样,每块样地随机选取 3 个个体,在每个个体林冠中选取 15 片成熟、完整的叶片,装入自封袋后标记。带回实验室内用剪刀除去叶柄,运用扫描仪(Cano Scan LiDE 300,北京,中国)和图像处理软件(Image J 1.49, <https://imagej.nih.gov/ij>)测量其单面叶面积。完成后,分别将样本装入信封袋,置于 65℃ 的烘箱中烘干(48 h)至恒重。然后用精度为万分之一的电子天平(FA2204,上海精科公司,中国)称取其叶片干重,比叶面积即为单面叶面积与叶干重比值(cm^2/g)。

表 1 样地信息
Table 1 Sample plot information

样地号 Number	样地大小 Size	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	海拔 Altitude/m	坡度 Slope	坡向 Aspect	林龄 Age/a	生长阶段 Growth stage	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	平均密度 Average stem density/(株/hm ²)
1	20 m×30 m	22.84978°	108.15663°	148	18°	南 180°	2	幼龄	8.65	8.99	1367
2	20 m×30 m	22.84924°	108.15669°	155	24°	南 200°	2	幼龄	8.94	9.32	1250
3	20 m×30 m	22.84875°	108.15739°	121	30°	西 290°	2	幼龄	10.41	8.98	1233
4	20 m×30 m	22.84839°	108.15636°	149	26°	东 95°	5	成熟	18.98	11.93	2016
5	20 m×20 m	22.84846°	108.15613°	152	30°	东 85°	5	成熟	19.95	11.99	2125
6	20 m×20 m	22.84856°	108.15634°	145	25°	东 79°	5	成熟	17.74	12.88	2000
7	20 m×20 m	22.84862°	108.15654°	155	28°	东 84°	5	成熟	19.43	12.24	2000
8	20 m×30 m	22.84796°	108.15809°	118	25°	西南 204°	10	过熟	22.84	17.67	1067
9	20 m×30 m	22.84732°	108.15873°	107	27°	南 163°	10	过熟	21.39	18.85	1317
10	20 m×30 m	22.84761°	108.15913°	120	22°	南 162°	10	过熟	19.93	16.51	1500

总叶生物量:利用每木检尺数据,结合周国逸等^[25]给出的广西桉树叶生物量异速生长方程(W 为叶生物量,单位 kg; D 为胸径,单位 cm),估算出每个二级小样方(10 m×10 m)的总叶生物量:

$$W = 0.7392 \times D^{0.2565} \tag{1}$$

最后,小样方的总叶生物量与比叶面积的乘积即为总叶面积的一半,按照 LAI 定义,用总叶面积的一半除以小样方的面积即可得到每个小样方的 LAI。

1.3.2 传统光学仪器

传统的光学仪器测量 LAI 基本是通过冠层透过率或间隙率进行反演,由于不同仪器间的传感器不一,对光环境的需求有所差异,具有一定适用条件(表 2),相应的测量方案也有所不同(图 2)。

表 2 传统的叶面积指数光学测量仪器参数
Table 2 Traditional optical instrument parameters for leaf area index

类型 Type	方法 Method	光谱范围 Spectral range/nm	测量值 Measurement	传感器 Sensor	天顶角 Zenith angle	方位角 Azimuth	参考 Reference	环境条件 Condition
辐射测量 Based on radiation	LAI-2200	320—490	散射光	鱼眼	0—75°	全方位	冠层下方	稳定阴天
辐射测量 Based on radiation	TRAC	400—700	直射光	光量子	太阳入射方向	太阳入射方向	冠层上方	稳定晴天
图像测量 Based on image	DHP	全波段	半球相片	CCD	0—90°	全方位	无需	稳定阴天

LAI-2200: LAI-2200 植物冠层分析仪 LAI-2200 Plant canopy analyzer; TRAC: 跟踪辐射和冠层结构分析仪 Tracing radiation and architecture of canopies; DHP: 数字半球摄影 Digital hemispherical photography; CCD: 电荷耦合元件 Charge-coupled device

(1) LAI-2200 植物冠层分析仪

本研究使用两台经相互定标匹配的 LAI-2200(LI-COR, Lincoln, USA)进行同步测量,一台置于林外空地

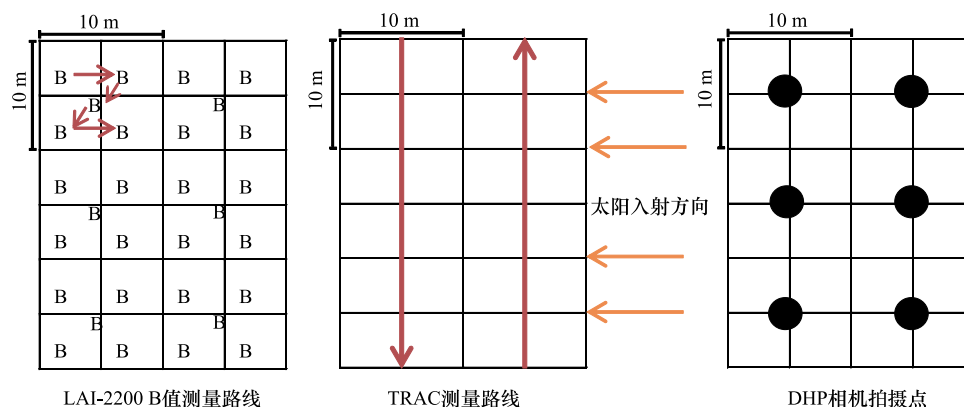


图2 不同的传统光学仪器测量方案

Fig.2 Different traditional optical instrument measurement schemes

上每隔 30 s 自动记录 A 值(即 Above 值,冠层上方值),另一台在样方内测量 5 个 B 值(即 Below 值,冠层下方值),选用 90°遮盖帽,在距地面 1.5 m 左右开展工作,测量前创建相应的散射校正文件,以便校正,测量时始终背对太阳。后期利用软件 FV2200 v2.1 将测量时间最接近的 A 值插入到对应的 B 值序列,完成匹配后开始计算 LAI。

(2) 跟踪辐射和冠层结构分析仪

将 TRAC(Wave Engineering, Nepean, Canada) 水平放置,保持距地面 1.5 m 左右,沿着小样方中间样线匀速行走,速度保持在 0.3 m/s 左右,测量轨迹垂直于太阳入射方向。在遇到障碍物时,暂停采集数据,但不关闭电源。每条样线来回测量两次,取其平均值作为测量结果,相应的数据处理在 TRAC Win 5.9.0 软件实现。

(3) 半球摄影法

将数码相机(Canon EOS 70D)和鱼镜头(Sigma EX-DC 4.5 mm)组合,通过三脚架固定在测量点地面以上的 1.5 m 处,将相机变焦镜头拉至最远,曝光模式调整为自动曝光,保持鱼镜头水平向上,手动拍摄小样方中心点的冠层全天空影像,获得的原始影像先通过 Sidelook 软件(<http://www.appleco.ch>)计算图像二值化阈值(天空和树冠成分的区分值),再导入 HemiView v2.1.1(Delta-T, Cambridge, UK)软件进行处理。

1.3.3 地基激光雷达

选用 Scanning System S-3180 三维激光扫描仪(PENTAX, Saitama, Japan)(分辨率 0.1 cm),在每个小样方中心点架站(高度约为 1.5 m)扫描,并向四周安插花杆和粘贴标靶纸(用做特征点,便于数据拼接),设置扫描质量和分辨率为高等级。利用 Z+F Laser control(Zoller+Fröhlich GmbH, Germany)软件进行数据去噪预处理,然后导入 LiDAR 360 软件(北京数字绿土公司,中国)进行配准和拼接、分离地面点等操作,最终计算 LAI(图 3)。

1.4 校正处理

研究根据 Chen 等^[26]提出的校正公式进行校正处理:

$$LAI_c = \frac{(1 - \alpha)}{\Omega_E} LAI_e \quad (2)$$

式中, LAI_c 为校正后的 LAI 值, LAI_e 为间接法获得的 LAI 值, α 为木质比例, Ω_E 为聚集指数。 α 客观上代表由木质部导致的高估贡献。由于 Ω_E 与 LAI_e 成反比关系,可用 $1 - \frac{1}{\Omega_E}$ 评估由聚集效应引发的低估程度。针对木质比例,可利用 Adobe PhotoShop CS6 软件对 DHP 摄取的冠层影像进行木质部去除处理。Qi 等^[27]认为去除过程中不应完全去除树干部分,应利用仿制图章工具把树干等木质部分用其附近非木质部分代替,避免去掉

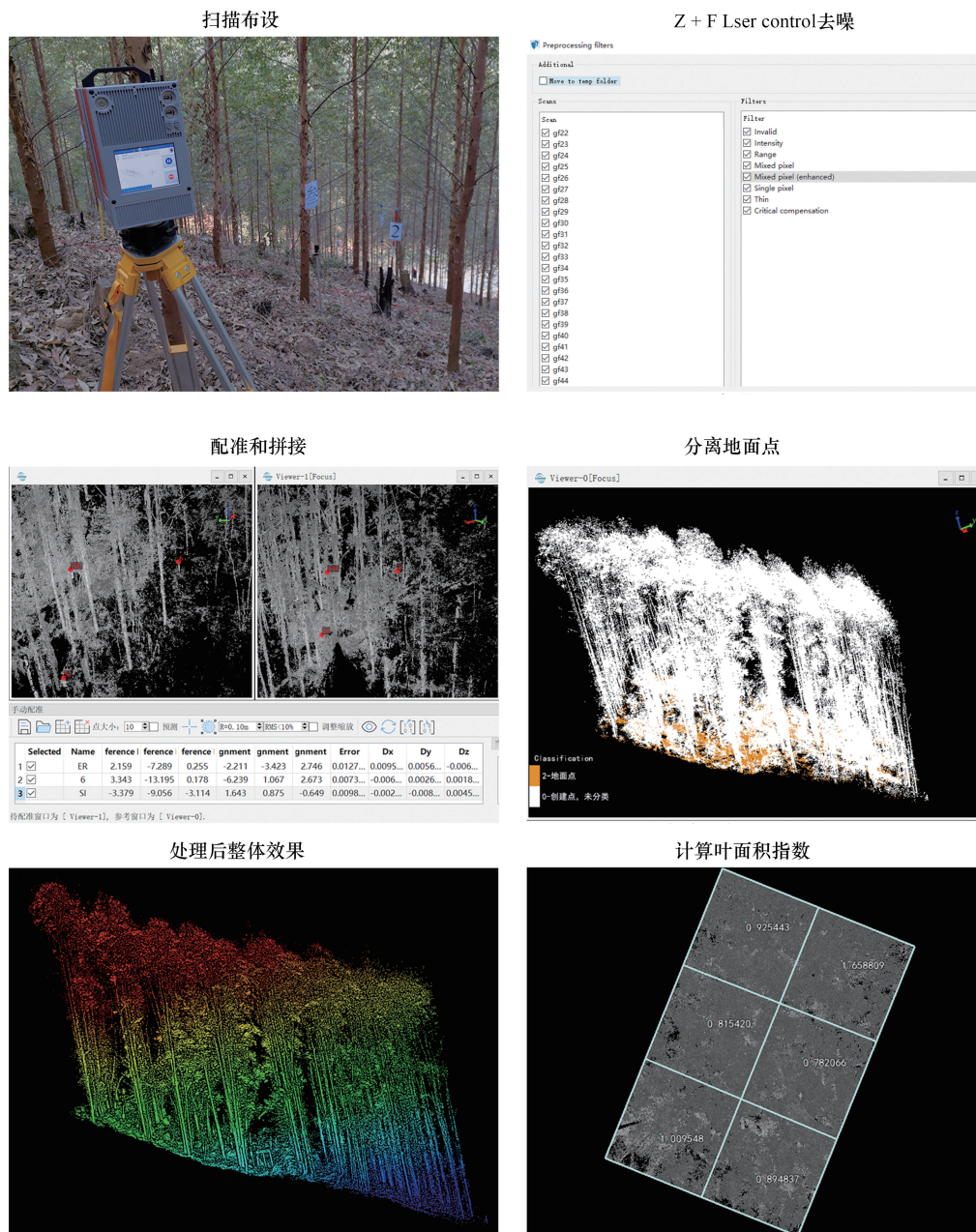


图3 地基激光雷达数据处理

Fig.3 Data processing by terrestrial laser scanning

树干时也同时去掉在树干背后的树叶部分。本研究对上述两种方法(即 PS 仿制法和完全去除法)都进行了处理(图 4),木质比例的计算公式如下:

$$\alpha = (L_1 - L_2) / L_1 \quad (3)$$

式中, L_1 为未处理前 HemiView 计算的 LAI, L_2 为经过去除处理 HemiView 再次计算的 LAI。

对于集聚指数 Ω_e , 直接通过 TRAC 获得。

1.5 数据分析

利用 SPSS Statistics 22(IBM, USA) 软件对不同方法测定的比叶面积、叶面积指数、校正系数进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 并利用 LSD 进行差异显著性检验。间接法估算差异 = (间接法 - 直接法) / 直接法 $\times 100\%$ 。

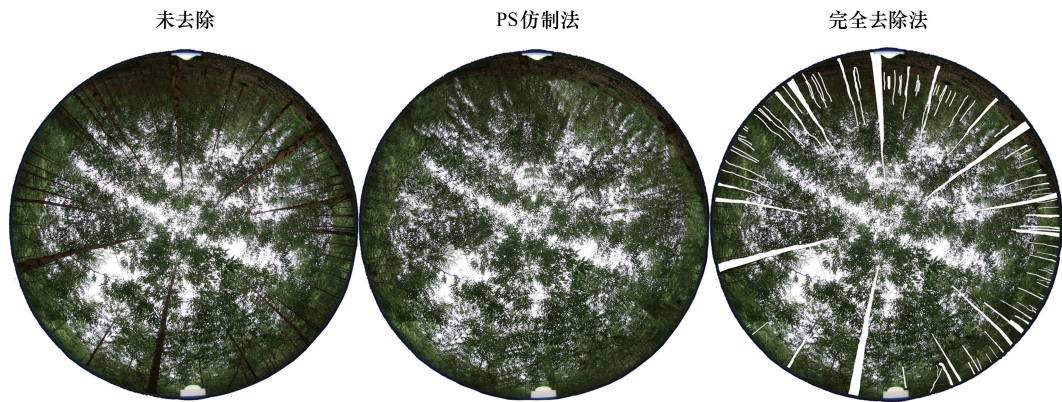


图 4 基于 DHP 冠层影像的木质组分处理

Fig.4 Wood component treatment based on Canopy image of DHP

2 结果

2.1 比叶面积

桉树人工林的比叶面积最大值为 167.45 cm²/g,最小值为 106.58 cm²/g,平均值为 (125.37±13.38) cm²/g (表 3)。

表 3 不同林龄桉树人工林的比叶面积

Table 3 The specific leaf area of *Eucalyptus* plantations in different growth stage

生长阶段 Growth stage	样本数 Number of samples	最大值 Maximum/ (cm ² /g)	最小值 Minimum/ (cm ² /g)	平均值±标准差 Mean±SD/ (cm ² /g)	变异系数 Coefficient of variation/%
幼龄 Young	9	132.05	114.73	122.43±6.60a	5.39
成熟 Mature	12	167.45	112.57	129.24±18.08a	13.99
过熟 Over-mature	9	140.38	106.58	123.15±10.88a	8.83

相同小写字母表示不同林龄桉树人工林的比叶面积差异不显著 ($P>0.05$)

2.2 直接法 LAI

通过异速生长法得到的桉树人工林 LAI 在不同林龄间的差异均显著 ($P<0.05$) (表 4)。相对于幼龄林和过熟林,成熟林 LAI 更为稳定(变异系数为 5.66%)。同时,可以看出 LAI 随着林龄的增加呈现先增加后减少的趋势,在成熟林中达到峰值,与桉树的生长发育状况相吻合。

表 4 不同林龄桉树人工林 LAI(异速生长法)

Table 4 The LAI of *Eucalyptus* plantations in different growth stage (Allometry)

生长阶段 Growth stage	样本数 Number of samples	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 Coefficient of variation/%
幼龄 Young	18	2.91	1.65	2.09±0.37a	17.93
成熟 Mature	18	3.84	3.24	3.54±0.20b	5.66
过熟 Over-mature	18	3.29	1.94	2.55±0.45c	17.65

不同小写字母表示 Allometry 获得的 LAI 在不同林龄桉树人工林中差异显著 ($P<0.05$)

2.3 间接法 LAI

不同间接法估算的 LAI 存在显著差异(图 5)。幼龄林中,LAI-2200、TRAC、DHP、TLS 测定的 LAI 分别为 1.81—2.61、2.10—3.88、1.48—2.43、0.64—1.22。与直接法相比(图 6),LAI-2200 和 TRAC 存在高估现象(平

均高估 9.99%、42.12%), DHP 和 TLS 表现为低估(平均低估 14.54%、57.58%);成熟林中, LAI-2200、TRAC、DHP、TLS 测定的 LAI 分别为 1.07—1.62、1.36—3.41、1.05—1.24、0.78—1.66。与直接法相比(图 6), 4 种间接法均存在低估现象, 平均低估 60.73% (LAI-2200)、31.68% (TRAC)、66.98% (DHP)、71.47% (TLS); 过熟林中, LAI-2200、TRAC、DHP、TLS 测定的 LAI 分别为 1.75—2.74、0.95—2.97、0.97—1.96、0.82—1.71。同样地, 4 种间接法均存在低估现象, 平均低估 7.74% (LAI-2200)、16.34% (TRAC)、41.05% (DHP)、53.79% (TLS)。

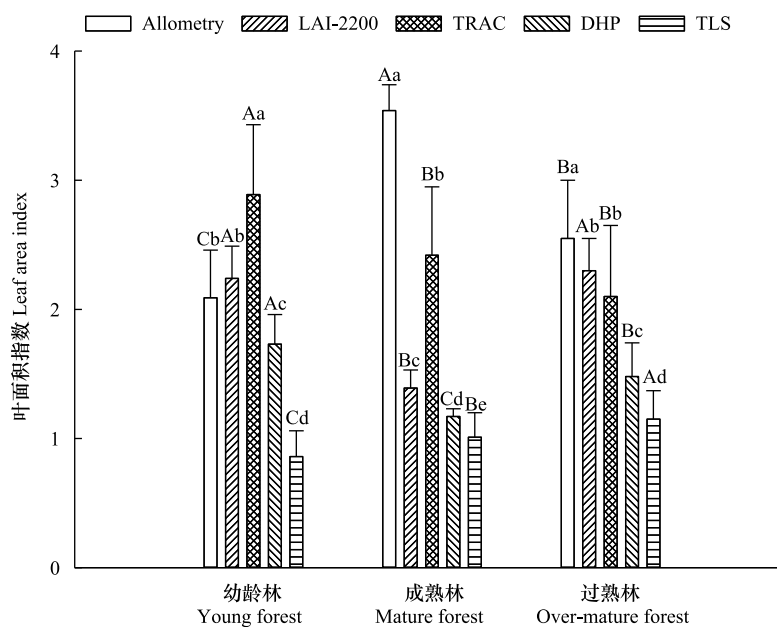


图 5 直接法和间接法得到的 LAI (平均值±标准差)

Fig.5 The LAI obtained by direct and indirect method (Mean±SD)

不同大写字母和小写字母分别表示同一方法不同林龄间、同一林龄不同方法间得到的结果差异显著 ($P < 0.05$); LAI-2200: LAI-2200 植物冠层分析仪 LAI-2200 Plant canopy analyzer; TRAC: 跟踪辐射和冠层结构分析仪 Tracing radiation and architecture of canopies; DHP: 数字半球摄影 Digital hemispherical photography; TLS: 地基激光雷达 Terrestrial laser scanning

在 PS 仿制法(表 5)中, 桉树人工林的木质比例变化范围在 0.33%—25.95%, 幼龄林与成熟林、过熟林的木质比例差异显著 ($P < 0.05$), 其平均值(木质部高估贡献)分别为 5.65% (幼龄林)、17.11% (成熟林)、16.30% (过熟林); 在完全去除法中, 木质比例的变化范围在 15.25%—52.13%, 不同林龄间差异均显著 ($P < 0.05$), 其平均值(木质部高估贡献)分别为 24.58% (幼龄林)、37.77% (成熟林)、45.47% (过熟林)。桉树人工林的聚集指数(表 6)变化范围在 0.63—1.00, 波动较小, 最大变异系数为 9.92%, 幼龄林与成熟林的聚集指数差异显著 ($P < 0.05$), 其平均值分别为 0.93、0.88、0.92, 则由聚集效应引发的低估程度分别为 7.53% (幼龄林)、13.64% (成熟林)、8.70% (过熟林)。

经过木质部和聚集效应校正后发现(图 6), 利用 PS 仿制法得到的 LAI 校正值和未校正时的 LAI 不存在显著差异, 完全去除法得到的 LAI 校正值与未校正时的 LAI 存在显著差异 ($P < 0.05$), 但校正结果进一步偏离了直接法, 扩大了与直接法的差异程度, 除幼龄林校正 TRAC 较好之外, 其余均存在过度校正现象。因而, 相对于完全去除法, 利用 PS 仿制法校正木质部影响更为合理。

3 讨论

3.1 直接法下桉树人工林的 LAI 对比

桉树林冠较小, 林冠孔隙度大, 林分郁闭度低, LAI 普遍较小^[28]。有学者认为, 我国桉树人工林的 LAI 一般在 1—4, 平均为 2^[29—30]。通过直接法测定桉树 LAI, 能够代表其真实值^[31]。本研究通过异速生长法测得桉

树人工林的 LAI 在 1.65—3.84, 平均为 2.73, 与上述学者的观点相近。由于桉树的速生性, 不同林龄下的桉树形态特征存在较大差异, LAI 也会有所不同。Van Bich 等^[32]通过破坏性取样法测得幼龄的桉树人工林 LAI 为 1.2—2.9; Mattos 等^[33]通过破坏性取样法测得成熟的桉树人工林 LAI 为 3—6; 竹万宽等^[34]通过异速生长法测得过熟的桉树人工林 LAI 为 0.88—1.12, 进一步说明桉树人工林的 LAI 在成熟阶段将达到峰值, 之后随着林龄的增长, 林冠逐渐衰退, 新叶生长停滞, 枝叶变得更为稀疏, LAI 随之减低。

表 5 不同林龄桉树人工林的木质比例

Table 5 The woody-to-total area ratio of *Eucalyptus* plantations in different growth stage

方法 Method	生长阶段 Growth stage	样本数 Number of samples	最大值 Maximum/%	最小值 Minimum/%	平均值±标准差 Mean±SD/%	变异系数 Coefficient of variation/%
PS 仿制法 PS imitation	幼龄	18	13.16	0.33	5.65±4.00a	70.71
	成熟	18	24.92	10.48	17.11±4.13b	24.15
	过熟	18	25.95	10.50	16.30±4.15b	25.47
完全去除法 Complete removal	幼龄	18	46.46	15.25	24.58±6.37a	25.93
	成熟	18	46.20	29.47	37.77±3.93b	10.40
	过熟	18	52.13	37.65	45.47±4.44c	9.76

不同小写字母表示同一方法下不同林龄桉树人工林得到的结果差异显著 ($P<0.05$)

表 6 不同林龄桉树人工林的聚集指数

Table 6 The clumping index of *Eucalyptus* plantations in different growth stage

生长阶段 Growth stage	样本数 Number of samples	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 Coefficient of variation/%
幼龄 Young	18	1.00	0.84	0.93±0.05a	5.07
成熟 Mature	18	0.95	0.76	0.88±0.06b	6.40
过熟 Over-mature	18	0.99	0.63	0.92±0.09ab	9.92

不同小写字母表示同一方法下不同林龄桉树人工林得到的结果差异显著 ($P<0.05$)

3.2 直接法与间接法的差异

在测量林分 LAI 时, 由于直接法在操作上耗时耗力且难以重复, 间接法凭借其快速、有效的特点已被广泛运用在实际测量当中^[31]。然而, 相比于直接法, 间接法的测量精度仍然有限, 进行相应的校正处理以更接近真实值是必要的^[35]。本研究中, 不同的间接法获得的桉树人工林 LAI 在大多数情况下都发生了低估(图 6)。类似的, Liu 等^[36]、Mattos 等^[33]发现 LAI-2000 和 DHP 在测量 LAI 时均存在低估现象, 平均低估 30%; Sprintsin 等^[37]、Li 等^[38]认为 TRAC 和 TLS 在测量 LAI 也会发生低估。本研究考虑了影响间接法测量精度的两大因素——木质部和聚集效应影响。一方面, 校正木质部偏差将去除其引发的高估贡献(表 5)。另一方面, 校正聚集效应将弥补其引发的低估程度(表 6), 故而在校正过程中会存在一定的抵消作用。本研究发现, 在桉树人工林中, 两者对间接法估测 LAI 的影响相当, 校正后 LAI 与未校正时不存在显著差异, 后续研究仍需要考虑其他影响因素。

3.3 不同间接法之间的对比

传统的光学仪器基于通用的 Beer 定律反演 LAI, 光环境的演变以及林冠层的复杂性会严重影响其测量精度^[39]。总的来看, 在没有校正的情况下, LAI-2200 的测量值比其它方法更接近于对照值, 这与 LAI-2200 内置精密的仪器配置以及可以选用不同的遮盖帽有关, 最大程度上减小了直射光的影响^[13,40]。在校正的情况下, 选用 DHP+TRAC 能够较为快速获取木质比例和聚集指数。与此同时, TRAC 的低估程度小于 DHP, 其测量值更为准确^[15,41], 主要是由于 DHP 在测量时还容易受到相机曝光设置的影响, 过度曝光会导致较大的图像亮度, 计算时容易将明亮的林冠误认为天空而忽略计算, 最终发生低估^[42]。另外, 不同天顶角范围也会影响其测量 LAI, 在 45°—60°天顶角范围内, 其校正效果较优^[8]。对于 TLS, 虽然不受光环境的限制, 但树木之间的

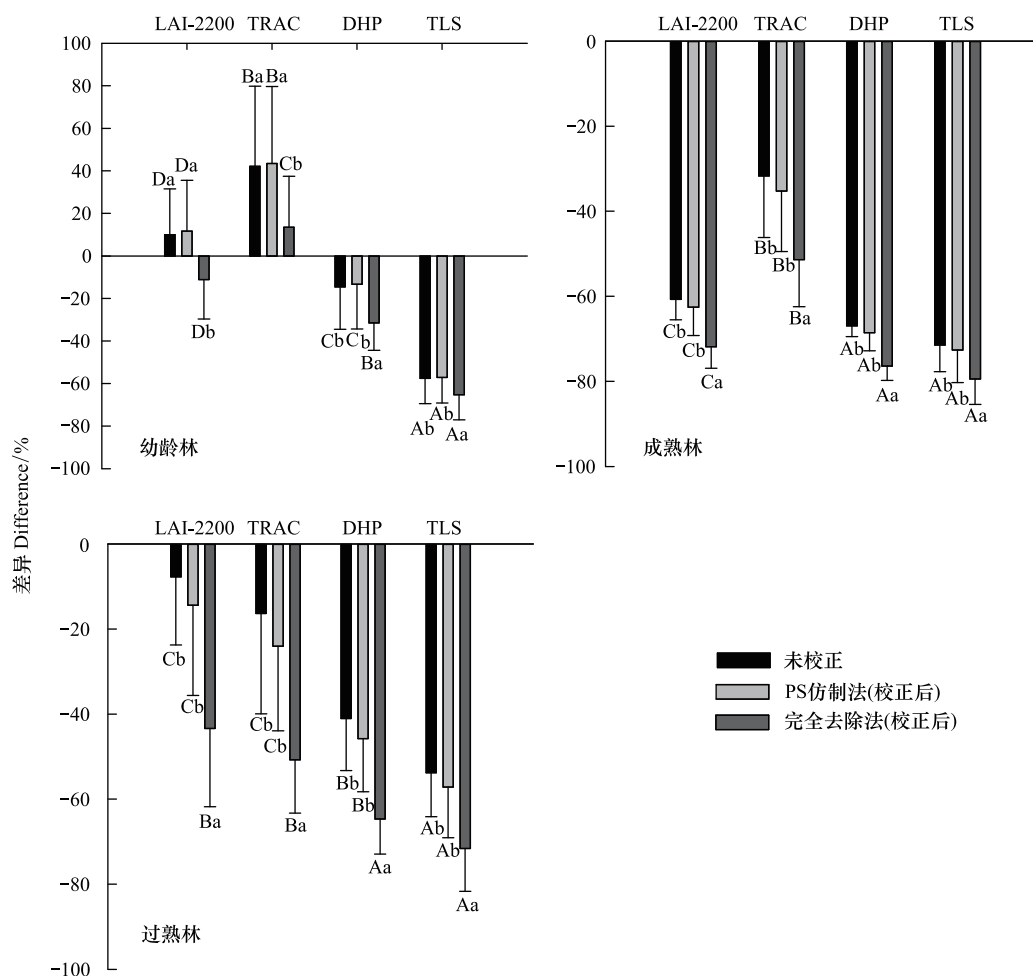


图6 不同间接法校正前后与直接法的估算差异(平均值±标准差)

Fig.6 Estimation difference between direct method and indirect method before and after correction (Mean±SD)

不同大写字母和不同小写字母分别表示同一校正方法不同测量仪器、同一测量仪器不同校正方法得到的结果差异显著 ($P < 0.05$); 差异 = (间接法-直接法)/直接法×100%

遮挡效应会严重阻碍了其完整获取数据^[43]。在林木较高,林冠复杂的环境下,也难以完整获取冠层上方的点云数据^[8,44],最终导致其发生低估。同时,在 TLS 的数据处理过程中,不同的滤波算法^[45]、不同的间隙率模型^[46]对其反演 LAI 也会产生重要影响,未来研究仍需要进一步考虑反演模型或是融合机载点云数据,将冠层上方的点云数据进行适当补充。

4 结论

(1) 不同林龄桉树人工林的 LAI 存在显著差异,随着林龄的增加呈现先增加后减少的趋势。

(2) LAI-2200、TRAC、DHP、TLS 等间接法估算桉树人工林的 LAI 存在显著差异,与直接法相比,大部分情况下存在低估现象。在没有校正的情况下,选用 LAI-2200 可以获得相对准确的 LAI。

(3) 相对于完全去除法,利用 PS 仿制法校正木质部影响更为合理。桉树人工林的木质成分和聚集效应对间接法测量 LAI 的影响程度相当。

参考文献 (References):

[1] Yan G J, Hu R H, Luo J H, Weiss M, Jiang H L, Mu X H, Xie D H, Zhang W M. Review of indirect optical measurements of leaf area index:

- recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 390-411.
- [2] Parker G G. Tamm review: leaf Area Index (LAI) is both a determinant and a consequence of important processes in vegetation canopies. *Forest Ecology and Management*, 2020, 477: 118496.
- [3] Kganyago M, Mhangara P, Alexandridis T, Laneve G, Ovakoglou G, Mashiya N. Validation of sentinel-2 leaf area index (LAI) product derived from SNAP toolbox and its comparison with global LAI products in an African semi-arid agricultural landscape. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(10): 883-892.
- [4] Liu F, Wang C K, Wang X C. Sampling protocols of specific leaf area for improving accuracy of the estimation of forest leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298-299: 108286.
- [5] Grotti M, Calders K, Origo N, Puletti N, Alivernini A, Ferrara C, Chianucci F. An intensity, image-based method to estimate gap fraction, canopy openness and effective leaf area index from phase-shift terrestrial laser scanning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 280: 107766.
- [6] 刘志理, 金光泽, 周明. 利用直接法和间接法测定针阔混交林叶面积指数的季节动态. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 843-856.
- [7] 周明, 刘志理, 金光泽. 利用 3 种校正方案提高间接法测定兴安落叶松人工林叶面积指数的精度. *植物生态学报*, 2016, 40(6): 574-584.
- [8] Guo Q H, Su Y J, Hu T Y, Guan H C, Jin S C, Zhang J, Zhao X X, Xu K X, Wei D J, Kelly M, Coops N C. Lidar boosts 3D ecological observations and modelings: a review and perspective. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2021, 9(1): 232-257.
- [9] 王宝琦, 刘志理, 戚玉娇, 金光泽. 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态. *生态学报*, 2014, 34(8): 1956-1964.
- [10] 刘志理, 金光泽. 光学仪器法测定叶面积指数季节变化的误差分析. *林业科学*, 2016, 52(9): 11-21.
- [11] Liu Z L, Jin G Z. Importance of woody materials for seasonal variation in leaf area index from optical methods in a deciduous needleleaf forest. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, 32(8): 726-736.
- [12] Fang H L. Canopy clumping index (CI): a review of methods, characteristics, and applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108374.
- [13] 苏宏新, 白帆, 李广起. 3 类典型温带山地森林的叶面积指数的季节动态: 多种监测方法比较. *植物生态学报*, 2012, 36(3): 231-242.
- [14] Zhu X, Skidmore A K, Wang T J, Liu J, Darvishzadeh R, Shi Y F, Premier J, Heurich M. Improving leaf area index (LAI) estimation by correcting for clumping and woody effects using terrestrial laser scanning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 276-286.
- [15] Zou J, Zuo Y, Zhong P H, Hou W, Leng P, Chen B. Performance of four optical methods in estimating leaf area index at elementary sampling unit of *Larix principis-rupprechtii* forests. *Forests*, 2020, 11(1): 30.
- [16] 王敏, 周润惠, 余飞燕, 董洪君, 陈聪琳, 喻静, 郝建锋. 不同林龄桉树人工林林下物种多样性和生物量的动态变化. *植物研究*, 2021, 41(4): 496-505.
- [17] 彭杏冰, 胡刚, 胡聪, 陆绍暖, 黄伶俐, 庞庆玲, 张忠华. 广西桉树人工林碳氮磷含量及其生态化学计量特征的纬度格局. *应用与环境生物学报*: 1-11. (2020-09-11). <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.05051>.
- [18] 张水花, 刘丽婷, 苏晨辉, 莫晓勇. 桉树纸浆用材林树冠结构与林分因子的关系研究. *林业与环境科学*, 2018, 34(3): 36-41.
- [19] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛桉树人工林凋落物量和养分循环研究. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(4): 359-366.
- [20] 温远光, 张祖峰, 周晓果, 朱宏光, 王磊, 蔡道雄, 贾宏炎, 明安刚, 卢立华. 珍贵乡土树种与桉树混交对生态系统生物量和碳储量的影响. *广西科学*, 2020, 27(2): 111-119.
- [21] 温远光, 陈放, 刘世荣, 梁宏温, 元昌安, 朱宏光. 广西桉树人工林物种多样性与生物量关系. *林业科学*, 2008, 44(4): 14-19.
- [22] 李慧, 陈少雄. 基于两种冠层分析仪的桉树叶面积指数测算. *桉树科技*, 2014, 31(1): 16-22.
- [23] 谭娟, 郭晋川, 吴建强, 李荣辉, 王敏, 王卿, 阮俊杰. 广西典型水库集水区巨尾桉和马尾松蒸腾作用. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 576-583.
- [24] 谭一波, 何琴飞, 郑威, 彭玉华, 侯远瑞, 何峰, 申文辉. 珠江流域中上游防护林冠层结构对林下植被的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3148-3156.
- [25] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 温达志, 刘昌平, 旷远文, 王万同. 中国森林生态系统碳储量: 生物量方程. 北京: 科学出版社, 2018: 56-57.
- [26] Chen J M, Rich P M, Gower S T, Norman J M, Plummer S. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D24): 29429-29443.
- [27] Qi Y J, Jin G Z, Liu Z L. Optical and litter collection methods for measuring leaf area index in an old-growth temperate forest in northeastern China. *Journal of Forest Research*, 2013, 18(5): 430-439.
- [28] 聂鑫, 章文波, 薛丽霞. 广西速生桉种植的空间分布及生态特征. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(2): 215-221.
- [29] 徐大平, 张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展. *广西林业科学*, 2006, 35(4): 179-187, 201-201.
- [30] 温远光. 连栽桉树人工林植物多样性与生态系统功能关系的长期实验研究. 成都: 四川大学, 2006.
- [31] 阎广建, 胡容海, 罗京辉, 穆西哈, 谢东辉, 张吴明. 叶面积指数间接测量方法. *遥感学报*, 2016, 20(5): 958-978.

- [32] Van Bich N, Mendham D, Evans K J, Dong T L, Hai V D, Van Thanh H, Mohammed C L. Effect of residue management and fertiliser application on the productivity of a *Eucalyptus* hybrid and *Acacia mangium* planted on sloping terrain in northern Vietnam. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 2019, 81(3): 201-212.
- [33] de Mattos E M, Binkley D, Campoe O C, Alvares C A, Stape J L. Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among *Eucalyptus* clones. *Forest Ecology and Management*, 2020, 463: 118038.
- [34] 竹万宽, 许宇星, 王志超, 杜阿朋. 不同生长阶段尾巨桉人工林土壤-微生物化学计量特征. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(4): 692-702.
- [35] 方红亮. 真实和有效叶面积指数及聚集指数的尺度效应. *地球信息科学学报*, 2021, 23(7): 1155-1168.
- [36] Liu Z L, Jin G Z, Chen J M, Qi Y J. Evaluating optical measurements of leaf area index against litter collection in a mixed broadleaved-Korean pine forest in China. *Trees*, 2015, 29(1): 59-73.
- [37] Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, Rotenberg E, Grünzweig J, Karnieli A, Berliner P, Yakir D. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(5): 565-574.
- [38] Li Y M, Guo Q H, Su Y J, Tao S L, Zhao K G, Xu G C. Retrieving the gap fraction, element clumping index, and leaf area index of individual trees using single-scan data from a terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 308-316.
- [39] Calders K, Origo N, Disney M, Nightingale J, Woodgate W, Armston J, Lewis P. Variability and bias in active and passive ground-based measurements of effective plant, wood and leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252: 231-240.
- [40] Wei S S, Yin T G, Dissegna M A, Whittle A J, Ow G L F, Yusof M L M, Lauret N, Gastellu-Etchegorry J P. An assessment study of three indirect methods for estimating leaf area density and leaf area index of individual trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 292-293: 108101.
- [41] Chen J M, Govind A, Sonnentag O, Zhang Y Q, Barr A, Amiro B. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 257-268.
- [42] 苑振皓, 金光泽, 刘志理. 自动曝光对半球摄影法测量叶面积指数及其季节变化的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4004-4012.
- [43] 刘鲁霞, 庞勇. 机载激光雷达和地基激光雷达林业应用现状. *世界林业研究*, 2014, 27(1): 49-56.
- [44] Yun T, Cao L, An F, Chen B Q, Xue L F, Li W Z, Pincebourde S, Smith M J, Eichhorn M P. Simulation of multi-platform LiDAR for assessing total leaf area in tree crowns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276-277: 107610.
- [45] 梁勇奇, 李明泽, 杨瑞霞, 耿同, 李欢. 不同滤波算法对反演叶面积指数的影响. *北京林业大学学报*, 2020, 42(1): 54-64.
- [46] Meng Y, Meng F R, Wu J Z, Lin W S. Comparison of four methods for estimating leaf area index based on terrestrial three-dimensional laser scanning. *Journal of Sustainable Forestry*, 2019, 38(3): 244-261.