

落叶收集法测定叶面积指数的快速取样方法

郭志华¹, 向洪波^{1,2}, 刘世荣^{1,*}, 李春燕¹, 赵占轻^{1,2}

(1. 中国林科院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 叶面积指数 (*LAI*) 是植被冠层结构的一个重要参数, 它不仅是许多生态和气候模型的重要输入变量, 而且是生态系统动态变化监测的一个重要指标。 *LAI* 可通过各种间接和直接的手段来观测, 而间接观测的 *LAI* 值常常需要直接的观测数据来校验。落叶收集法是一种广泛使用的直接观测 *LAI* 的方法, 过去的研究还未发现有涉及落叶收集的取样技术及其观测精度的内容。对长白山和北京地区落叶阔叶林的落叶进行了 3a 的观测, 每年一次性收集落叶样品分析, 研究结果表明: ①不同层次落叶的含水量差异巨大, 且落叶含水量的日变化明显。上下层落叶的含水量绝对值差异高达 10% 以上, 日变化绝对值差异高达 20% 以上。因此, 在野外收集落叶样本时, 为减小落叶含水量变化所导致的 *LAI* 观测误差, 应从上到下直到地面进行取样, 且尽可能多地收集落叶样本。②在落叶阔叶人工林和天然林里, 无论样地的大小 (1hm² 或 30m × 30m 样地), 无论取样单元的大小 (1m² 或 25m² 分辨率), 林内的 *LAI* 分布很不均匀, *LAI* 介于 0—15.5 (1m² 分辨率的 1hm² 样地) 或者 2.6—9.1 (25m² 分辨率的 30m × 30m 样地)。③要准确测定落叶林的 *LAI*, 收集落叶的样地面积越大越好, 且尽量选择地势平坦的样地。对于 1hm² 或者 30m × 30m 大小的样地, 可随机布设一个 10m × 10m 的小样地来观测, 精度分别可达 85%、80%。④10m × 10m 小样地的 *LAI* 观测, 可将其分为 4 个相邻的 5m × 5m 小样进行取样。对每个 5m × 5m 小样, 快速的取样方法是: I. 随机布设 6 个 1m² 取样, 这样取样可以保证在 99% 概率水平上, 100m²、30m × 30m 和 1hm² 样地的 *LAI* 观测精度分别为 90%、75%、70% 左右。II. 随机布设 11 个 1m² 取样。可以保证在 99% 概率水平上, 100m²、30m × 30m 和 1hm² 样地的 *LAI* 观测精度分别为 94%、80%、75% 左右。

关键词: 叶面积指数; 落叶收集法; 取样方法; 落叶林

Sampling method for rapid measurement of leaf area index by leaf litter collection in deciduous forests

GUO Zhihua¹, XIANG Hongbo^{1,2}, LIU Shirong^{1,*}, LI Chunyan¹, ZHAO Zhanqing^{1,2}

1 The Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 School of Geographic Science, Southwest University, Chongqing, 400715, China

Abstract: Leaf area index (*LAI*), an important biophysical parameter of canopy structure, is not only a variable of significance to ecological and climatic models, but also a indicator for monitoring ecosystem dynamic. *LAI* can be estimated using various indirect and direct methods. The leaf litter collection method is widely used as a direct method to measure *LAI* in deciduous forests. Indirect measurements using radiation transmittance and gap fraction theory are often compared and calibrated by direct litter fall measurement, which is considered as a reference method. However, few studies have addressed the question of sampling strategy and the precision of *LAI* estimation by leaf litter collection so far. This study examined the above methodology with disposable leaf litter collection in the deciduous forests in Changbai Mountain and Beijing region after defoliation. The main results were showed as follows: (1) The difference of moisture content between the upper and lower layer of the leaf litter was significant with the absolute variation of 10.0% and the diurnal variation of the leaf litter moisture content was also significant with the absolute variation of 20%. Therefore, litter samples must be directly collected as much as possible from top to bottom layer in order to reduce the error of *LAI* measurement caused by

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (30590383); 国家“十一五”科技支撑资助项目 (2006BAD03A04, 2006BAD03A16); 国家林业公益性行业专项资助项目 (200804001)

收稿日期: 2009-01-12; 修订日期: 2009-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

leaf litter moisture content variability. (2) The distribution of *LAI* measured either in plantation or natural forests was uneven, regardless of sampling size (1 m^2 or 25 m^2) and the size of sampling units at resolution of 1 hm^2 plot or $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ plot. The variation ranged from 0 to 15.5 (at 1 m^2 resolution) or from 2.6 to 9.1 (at 25 m^2 resolution). (3) The larger area of the litter sampling, the higher accuracy of *LAI* estimation in deciduous forests, and the sampling should be conducted in a flat land surface, For a plot of $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ or 1 hm^2 , a 100 m^2 ($10\text{ m} \times 10\text{ m}$) subplot should be randomly sampled, and this led to the precision of *LAI* estimation up to 85% and 80%, respectively. (4) For the subplot ($10\text{ m} \times 10\text{ m}$), the four adjacent $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ sub-plots could be further divided and sampled. The rapid measurement for each $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ sub-plot was conducted in the following: I Six sampling units of each 1 m^2 in size were randomly set up and the precision of *LAI* estimation in 100 m^2 plot, $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ plot and 1 hm^2 plot were 90%, 75% and 70% respectively (at the level of 99% probability). II Eleven sample units of each 1 m^2 in size were randomly set up and the precision of *LAI* estimating in 100 m^2 plot, $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ plot and 1 hm^2 plot were about 94%, 80%, and 75% respectively (at the level of 99% probability).

Key Words: leaf area index; leaf litter collection; sampling strategy; deciduous broadleaf forest

叶面积指数(Leaf Area Index, *LAI*)是植被冠层结构的一个重要参数,它控制着植被的许多生物、物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等,既是许多生态和气候模型的一个关键变量^[1-6],也是森林生态系统变化监测的一个重要指标^[7]。*LAI*的大面积监测在热带森林的可持续森林经营和环境或生态服务中也有重要意义^[8]。*LAI*的定义主要有4种^[3],但多表示为单位地面上叶表面积(或总叶面积)的一半^[1,9-10]或单位地面上叶的水平投影面积^[8,11],本研究采用前一种定义。

*LAI*的观测方法可分为间接和直接观测两大类。间接观测包括异速生长方程法、各种光学仪器的观测及遥感估算等。(1)异速生长方程法通常是通过选择有代表性的各个物种,建立其可测定的物理变量与*LAI*之间的经验关系来估算*LAI*^[12-16]。(2)光学仪器方法基于太阳辐射通过林冠时的衰减比例和冠层叶片是随机分布的假设条件来实现。由于叶片常常是集群分布的,光学仪器所测得的*LAI*值常常偏低^[17-21]。Hall^[2]通过利用TRAC(tracing radiation and architecture of canopies system)仪器来观测叶片的集群指数,结合*LAI*-2000来提高对林冠*LAI*的观测精度。为了避免低估巴西亚热带地区植被的*LAI*值,Xavier^[22]在阴天或者9:00前16:00后利用*LAI*-2000进行观测。*LAI*-2000的观测值还可以通过Frazer^[23]提供的方法来校验^[24]。此外,半球成像技术也被用于*LAI*的间接观测,其原理是利用180°鱼镜头获得冠层影像,再利用专业软件来分析影像、计算*LAI*^[21,25]。(3)遥感被广泛用于区域和全球的*LAI*监测^[3,10,15,19,22,26-32],主要通过建立机载和卫星影像与地面观测的*LAI*数据之间的模型来实现。

间接观测的*LAI*数据常需要直接的*LAI*观测值来校验^[33],仅少数研究未有地面验证^[29]。在热带雨林中,由于难以通过破坏性取样直接测定*LAI*,只能将*LAI*-2000测定的*eLAI*权作为雨林的*LAI*^[8]。直接的*LAI*观测方法包括破坏性取样、落叶收集法和倾斜点嵌块法等^[8]。(1)破坏性取样通过摘叶、砍枝、砍树来直接测定*LAI*^[20-21],会耗费大量的人力和物力,且不利于*LAI*的动态变化监测。(2)落叶收集法通过观测落叶生物量和比叶面积(*SLA*)来计算*LAI*,是一种广泛应用于落叶林*LAI*的直接观测法。落叶收集法多用于校验*LAI*的间接观测值^[33],可通过多次收集^[10,17,33]或落叶完成后一次收集落叶来完成^[11]。但*SLA*易受叶的形态特征和环境因子(如土壤水和养分等)的影响^[33-37],如:法国东北部山毛榉林*SLA*的空间变化最大可导致24%的*LAI*观测误差^[33]。此外,落叶层水分含量变化对*LAI*的观测影响很大。

虽有大量研究涉及利用落叶收集法直接观测*LAI*,但试验方案各不相同、甚至相差甚远。Cutini^[17]在落叶林里随机布设9—28个面积 0.25 m^2 或 0.5 m^2 的收集筐(trap)来收集落叶,直接观测落叶林的*LAI*。Clough^[38]仅利用3个 1 m^2 收集筐来收集红树林落叶以计算其*LAI*。在一个 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的样地上,Bouriaud^[33]仅仅在距离样地中心4m的4个主要方向上各布置一个 0.5 m^2 的收集筐来收集落叶。Raffy^[11]使用 5 m^2 或 10 m^2 的分辨

率来度量 100m²样地的叶面积指数。Nasahara^[39]在 1hm²样地内,人为选择具有代表性的 14 个 1m²收集筐来收集落叶。有的研究仅在每个样地使用 8—10 个内径为 21cm 的收集筐^[28],或者 10—20 个直径为 50cm 的收集筐^[10,40]。迄今,很少研究涉及落叶收集法的方法学问题,收集筐数量与 LAI 估算精度之间的关系如何?布设多少、如何布设收集筐才能在有限人力、物力条件下实现快速、准确地观测 LAI?这正是本文试图解决的问题。

通过在中国长白山天然落叶林和北京人工落叶林 LAI 的落叶收集法观测,研究了落叶含水量的空间和时间变化及其对 LAI 观测精度的影响,探讨了落叶林 LAI 的快速取样技术、并评估其精度,这即可为校验 LAI-2000 的间接观测 LAI 值及为长白山林区 LAI 的遥感估算奠定基础,也可为其他地区的落叶取样技术提供参考。

1 数据和方法

1.1 实验地概况

天然落叶林实验地位于长白山自然保护区的落叶阔叶林内。长白山年均温 -7.3—4.9℃,年平均降水量 600—900mm。试验地位置范围:42°20′—42°24′N、128°05′—128°10′E,海拔 700—800m,坡度在 <5°。优势树种主要为紫椴(*Tilia amurensis*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer mono*)、假色槭(*Acer pseudo-sieboldianum*)、柠劲槭(*Acer triflorum*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、春榆(*Ulmus japonica*)等,偶见红松(*Pinus koraiensis*)。下木主要为暴马丁香(*Syringa reticulata* var. *mandshurica*)、山槐(*Maackia amurensis*)等,灌木主要是毛榛子(*Corylus mandshurica*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、忍冬(*Lonicera chrysantha*)等,草本植物有山茄子(*Brachyotrys paridiformis*)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、透骨草(*Phryma leptostachya*)、水金凤(*Impatiens nolitangere*)等。

人工落叶阔叶林实验地位于北京怀柔,40°19′N、东经 116°35′E。北京为暖温带半湿润季风气候,年平均气温 10.4℃,年平均降水量 600mm 左右。人工林为单一的杨树(*Populus deltoides*),栽培间距为 5m × 3m。杨树林树高约 20m,林龄约 10a,胸径介于 16—25cm 之间。

1.2 样地设置

在长白山,选择典型落叶阔叶林,样地面积分别取 20m × 50m(1 个)、30m × 30m(3 个)、100m × 100m(2 个)。在北京的人工落叶阔叶林中设置 2 个 30m × 30m 的研究样地。每个样地均以 1m²为取样单元。

长白山样地取样时间:2004-09-28—10-14、2007-10-19—11-01、2008-10-13—10-30;北京杨树人工林取样时间:2004-10-20—11-05。

1.3 落叶收集方法

落叶收集仅选择当年落叶,且当年落叶并不难区分^[11]。对每个 1m²小样,收集所有当年落叶,称鲜重。每个 1hm²样地,各取样 10000 次。

由于落叶较厚,为判断落叶不同层次含水量差异对 LAI 计算的影响,在不同天气条件下,选择若干个 1m²小样方,分上下两层(根据落叶层的厚度,平均分为上下两层)取样、称鲜重,带回实验室烘干称重。

叶片水分含量日变化及样叶干重的观测:由于野外收集落叶时间较长,为减少落叶层含水量的日变化导致 LAI 估算误差,每隔 1h,分别在 3—4 个 1m²小样方中,将上下层落叶充分混合后,各取 50—100g 落叶样品称鲜重(精度 0.1g),用塑料袋密封、编号,带回实验室 70℃ 恒温、48h 烘干至恒重,称样叶干重;最后计算每个 1m²小样方的叶干重。

1.4 比叶面积(SLA)和叶面积指数(LAI)估算

成熟落叶林内落叶较厚,观测每片树叶的重量和叶面积(LA)十分困难,但仅取 30 片落叶^[33]也显不够。

SLA 的野外取样:在每个 5m × 5m 中选择完好的叶片 50 片,用塑料袋密封、编号,带回实验室。每个 1hm²样地设 400 个 SLA 取样。

SLA 的室内观测:将每个 SLA 样叶用 Licor 3000(LI-COR, Inc., USA)测其叶面积,然后将样叶置于烘箱,

在 70℃ 恒温、48h 烘干至恒重,测干重(精度 0.01g);计算每个 5m × 5m 小样中的 *SLA*。

根据每个 1m² 小样方的干重和 *SLA*,计算每个 1m² 小样方的 *LAI*。

1.5 数据处理

实验数据处理、分析均在 Matlab(6.5.1) 软件下完成。

随机取样方法:无论是 1hm² 还是 30m × 30m 的样地,在 Matlab 中,均设置 10 × 10 的随机系数矩阵来提取样地 *LAI* 值,矩阵的每个元素代表一个 1m² 小样的空间位置。这个矩阵由 4 个相邻 5 × 5 子矩阵组成,每个 5 × 5 子矩阵内随机提取 *n* 个元素的值为 1(*n* 取 1,2, …, 11,代表每次随机取 1m² 小样的个数为 1,2, …, 11),其余元素的值为 0。对于 1hm² 样地,共有 8281 个 10 × 10 的组合方式,对每个 10 × 10 组合、每种取样方式(每次随机取 1m², 2m², …, 11m²) 的随机取样 1000 次,每个取样方式共计 8281000 次取样。

LAI 的精度估算:根据随机矩阵中提取的小样方 *LAI* 值,计算不同取样方式的 *LAI* 值及其精度。

2 实验结果与讨论

2.1 落叶层的含水量变化对叶面积指数估算的影响

实验结果表明:在 1m² 取样内,不同层次(上下两层)落叶的含水量显著不同(*P* < 0.05),差异在 3.43%—11.33% 之间。通常地,越接近地面,落叶的含水量越大,特别是在落叶堆积较厚的林地,这种差异更显著(表 1)。在晴天,上下层落叶的含水量的差异通常比在阴天大。因此,用于计算落叶含水量的采样,不能只取上层或者只取下层的落叶。

长白山天然落叶林落叶层水分含量日变化显著,尤其是夏季晴天(图 1)。早上最高、下午最低,极差达 21.9%,大小差异在 1 倍以上。因此在进行大量野外观测时,若观测时间持续较长,应尽可能增加收集样叶次数,以降低因落叶含水量日变化而引起的 *LAI* 计算误差。

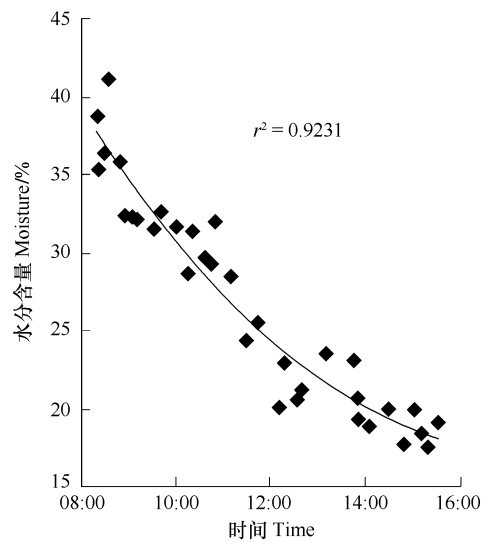


图 1 晴天落叶层含水量日变化
Fig. 1 Daily change of the leaf litter moisture in sunny days

表 1 不同层次落叶的含水量

Table 1 Moisture content of leaf litter at different layers

观测点(观测次数) Observation point (Sample numbers)	晴天 Sunny 1(3)		晴天 Sunny 2(3)		晴天 Sunny 3(2)	
观测层次 Different layers	上 Upper	下 Lower	上 Upper	下 Lower	上 Upper	下 Lower
含水量 Moisture content (± SE)/%	23.51(± 1.9)	29.62(± 1.1)	12.10(± 2.8)	22.19(± 1.8)	10.72(± 2.1)	14.05(± 1.9)
difference level	* * *		* * *		* * *	
观测点(观测次数) Observation point (Sample numbers)	阴天 Cloudy 1(2)		阴天 Cloudy 2(4)		阴天 Cloudy 3(3)	
观测层次 Different layers	上 Upper	下 Lower	上 Upper	下 Lower	上 Upper	下 Lower
含水量 Moisture content (± SE)/%	58.46(± 3.2)	69.73(± 4.0)	30.29(± 2.3)	33.72(± 0.9)	27.21(± 2.7)	31.29(± 1.9)
difference level	* * *		* * *		* * *	

* * *P* < 0.05, * * * *P* < 0.01

2.2 落叶收集法测定 *LAI* 的取样技术

人工落叶阔叶林是一个表面上均一的森林,事实上林内的 *LAI* 空间变化依然很大。对 2 个 30m × 30m 的杨树人工林样地测得的 *LAI* 值分析得知,若以 1m² 大小为取样单元,落叶人工阔叶林内的 *LAI* 平均值为分别为 (6.52 ± 1.02)、(6.34 ± 0.94),变异系数(*CV*)分别为 0.157、0.148, *LAI*_{min} = 3.65, *LAI*_{max} = 7.95, *LAI*_{max} /

$LAI_{min} \approx 2.18$ 。由此可见,即使是人工落叶阔叶林,林内 LAI 的空间变化依然很大,而并非是“均一森林内 LAI 的波动很小”^[11]。将相邻 1m^2 取样单元合并为 25m^2 取样模式, $LAI_{max} = 7.56$, $LAI_{min} = 4.43$, $LAI_{max}/LAI_{min} \approx 1.71$ 。所以,仅仅 25m^2 大小的取样来代表 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的样地还可能存在较大误差。

与人工落叶林相比,天然落叶林内 LAI 的空间变化相对更大。因此,本文以下部分仅以天然落叶阔叶林内的观测数据来探讨 LAI 的快速取样技术:以 1hm^2 大小样地来探讨天然林 LAI 的地面最小取样面积和精度; $30\text{m} \times 30\text{m}$ (相当于一个 TM 像元大小)天然林样地的最小取样面积和精度。

2.2.1 100m × 100m 样地 LAI 观测与取样

基于 2 个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 样地的取样观测发现:由于微地形变化以和林内众多倒木,在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 大小的天然林样地内,以 1m^2 大小为取样单元,林内 LAI 的空间变化剧烈(图 2)。 LAI_{max} 分别为 14.87 和 15.53, LAI_{min} 都为 0, LAI 平均值为分别为 $6.14(\pm 1.44)$ 、 $6.31(\pm 1.43)$, 变异系数(CV)分别为 0.234、0.226。

由相邻的 1m^2 组合为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ (96 × 96 个)、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ (91 × 91 个)、 $20\text{m} \times 20\text{m}$ (81 × 81 个)、 $25\text{m} \times 25\text{m}$ (76 × 76 个)、 $30\text{m} \times 30\text{m}$ (71 × 71 个)等不同模式的取样大小,分别计算其在 1hm^2 样地内的 LAI 观测误差(视 1m^2 取样计算的样地 LAI 均值为 1hm^2 样地 LAI 的真实值)(表 2)。不同取样大小的误差不同:(1) 25m^2 取样单元的 LAI 介于 2.6—9.1 之间。在 99% 概率水平上, 1hm^2 样地 LAI 的平均观测精度约为 54.6%。因此,仅用一个 25m^2 取样单元来观测整个 1hm^2 样地的 LAI ,其精度较低。(2) 若以 100m^2 为取样单元, LAI 的观测平均误差介于 -41.1%—22.6% 之间。在 99% 概率水平上, 1hm^2 样地 LAI 的平均观测精度约为 80.2%。(3) 取样面积越大, 1hm^2 样地的 LAI 观测精度越高。若以 400m^2 为取样单元,观测误差介于 -9.5%—8.9% 之间;在 99% 概率水平上, 1hm^2 样地 LAI 的平均观测精度约为 91.1%。若以 625m^2 为取样单元,观测误差介于 -6.9%—7.3% 之间;在 99% 概率水平上, 1hm^2 样地 LAI 的平均观测精度约为 93.5%。若以 900m^2 为取样单元,观测误差介于 -4.6%—5.1% 之间;在 99% 概率水平上, 1hm^2 样地 LAI 的平均观测精度约为 95.4%。但随着取样单元增大,取样工作量急剧增加。

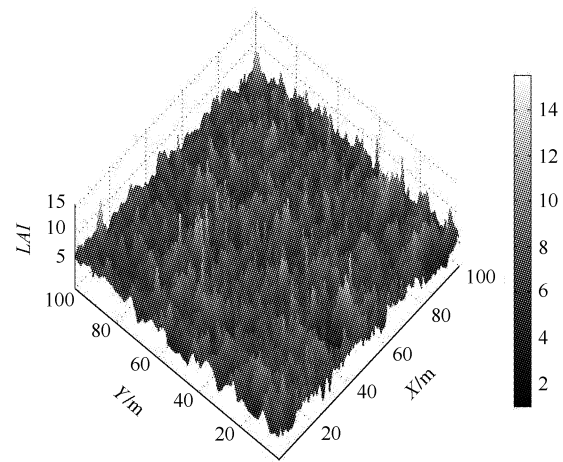


图 2 1 hm² 样地内 LAI 分布图(1m² 取样单元)
Fig.2 LAI distributions in 1 hm² plot (at 1 m² resolution)

表 2 1hm² 样地内各种组合单元的取样误差

Table 2 Error of LAI estimation with different combined units in 1 hm² plot

误差范围 Error range/%	< -30	-20—-30	-20—-10	-10—0	0—10	10—20	20—30	> 30
25 m ² 组合单元个数 Number of combined units of 25 m ²	1149	1402	1704	5745	5416	1501	893	622
100 m ² 组合单元个数 Number of combined units of 100 m ²	50	57	358	8252	7356	479	10	0
400m ² 组合单元个数 Number of combined units of 400 m ²	0	0	0	6370	6752	0	0	0
625 m ² 组合单元个数 Number of combined units of 625 m ²	0	0	0	5645	5907	0	0	0
900 m ² 组合单元个数 Number of combined units of 900 m ²	0	0	0	5014	5068	0	0	0

由此可见,对于一个 1hm^2 大小的天然林样地,若精度要求不高(精度 80% 以上),则可以随机布设一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的小样地(sub-plot)。要取得较高的观测精度,取样单元面积越大越好,当取样单元为 $20\text{m} \times 20\text{m}$

时,可以保证整个 1hm^2 样地 LAI 的观测精度达 90% 以上;取样单元为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 时,可以保证整个 1hm^2 样地 LAI 的观测精度达 95% 左右。

2.2.2 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地 LAI 观测与取样

在 3 个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 天然落叶阔叶林样地,以 1m^2 大小取样单元, $LAI_{\max}$ 分别为 12.87、14.62、14.24, $LAI_{\min}$ 都为 0, CV 分别为 0.175、0.191、0.184,可见林内 LAI 的空间变化显著,但比 1hm^2 样地小。

将相邻 1m^2 分辨率取样合并为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ (26×26 个)、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ (21×21 个) 取样模式,讨论各种取样单元在 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的误差(视 1m^2 取样的 LAI 均值为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的真实值)。实验结果表明:若以 25m^2 分辨率为取样单元, LAI 观测误差介于 -44.2% — 35.4% 之间,在 99% 的概率水平上, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 观测精度仅为 60.3%;当取样单元为 100m^2 时, LAI 观测误差介于在 -24.6% — 19.2% 之间,在 99% 的概率水平上,可以保证 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 观测精度在 84.8% 以上。

在 1hm^2 大小天然林样地内,将相邻 1m^2 单元合并,可得 5041 个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地。基于 2 个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 样地内所有 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地,分别计算 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 取样模式对于估算各个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地 LAI 的取样误差(表 3)。由表 3 可知:(1)以 25m^2 为取样单元, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地的 LAI 观测误差介于 -53.2% — 38.3% 之间,在 99% 概率水平上, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 观测精度约 59.5%,可见随机布设一个 25m^2 小样来观测 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI ,其精度较低。(2)若以 100m^2 为取样单元, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地的 LAI 观测误差介于 -26.2% — 21.8% 之间,在 99% 概率水平上, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地的 LAI 观测精度约 85.4%。

综上所述,对于一个 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地, LAI 地面观测的快速取样方法是:随机布设一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的小样,这可以在 99% 概率水平上保证 LAI 观测精度在 85% 左右。

表 3 1hm^2 样地 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 组合样地内取样误差

Table 3 Sampling error of LAI estimation in $30\text{m} \times 30\text{m}$ combined units in 1hm^2 plot

误差范围 error range(%)	< -30	-20—-30	-20—-10	-10—0	0—10	10—20	20—30	> 30
$5\text{m} \times 5\text{m}$ 组合单元个数 Number of combined units of $5\text{m} \times 5\text{m}$	161732	433033	568518	2372221	2266762	710977	205468	96721
$10\text{m} \times 10\text{m}$ 组合单元个数 Number of combined units of $10\text{m} \times 10\text{m}$	0	13042	90321	2190572	2052796	94262	5169	0

2.2.3 基于 1hm^2 样地数据的 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 小样地 LAI 的取样与精度

$10\text{m} \times 10\text{m}$ 样地 LAI 观测与取样,可以将其视为 4 个相邻的 25m^2 小样。在每个 25m^2 小样随机布设不同数量(1, 2, ..., 11 个)的 1m^2 取样单元,其 LAI 的测算精度不同。

在一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的样地中,对每个 25m^2 小样随机设置 1—11 个 1m^2 取样单元,约共有 3.9×10^5 — 1.0×10^{57} 次可能组合,穷尽所有组合比较困难。

1hm^2 样地内,可以有 8281 个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 组合样地。对于每种布样方法,利用所设置的 10×10 随机系数矩阵,对 2 个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 样地内的每个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 组合样地随机提取 1000 次。因此,在 2 个 1hm^2 样地内,对于每种布样方法均共有 1.656×10^7 次随机抽样。分别计算每种布样方法在 100m^2 样地, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地和 1hm^2 样地的 LAI 取样误差(表 4、图 3 和图 4)。

基于 1hm^2 样地的 LAI 实测数据, 100m^2 组合小样地内不同取样方式的 LAI 观测精度不同:(1)在每个 25m^2 小样,随机布设 1—5 个 1m^2 取样单元,在 99% 的概率水平上, 100m^2 样地的精度分别可以保证在 54.6%、65.7%、74.4%、82.1%、89.4% 左右; $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 观测精度,分别可以保证在 45.2%、56.4%、65.8%、71.2%、73.6% 左右; 1hm^2 样地的 LAI 观测精度,分别可以保证在 36.5%、50.2%、61.1%、65.3%、68.0% 左右。可见,对于 100m^2 样地,在每个 25m^2 小样,至少需要随机布设 3 个 1m^2 取样单元才能基本满足 LAI 快速观测的精度要求;对于 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地,在每个 25m^2 小样,至少需要随机布设 4 个 1m^2 取样单元才能保证 LAI 快速观测的精度在 70% 以上;对于 1hm^2 样地,在每个 25m^2 小样,随机布设 5 个 1m^2 取样单元,其 LAI

观测精度仅为 68% 左右,这样的取样还不能满足 1hm^2 样地 LAI 快速观测的精度要求。(2) 当 25m^2 小样地中随机 6 个 1m^2 取样单元时, 100m^2 样地 LAI 观测误差介于 -12.8% — 11.6% 之间,在 99% 的概率水平上, 100m^2 样地、 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地和 1hm^2 样地的 LAI 观测精度分别可以保证在 89.6%、75.3%、70.3% 左右。因此,每个 25m^2 小样内随机布设 6 个 1m^2 取样单元, 100m^2 样地的 LAI 精度可达 90% 左右, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 精度也可达 75% 以上,基本可满足森林 LAI 快速调查的精度要求;(3) 增加 1m^2 取样单元的数目,可提高 LAI 观测精度,野外工作量也随之迅速增加。每个 25m^2 小样内随机布设 7—11 个 1m^2 取样单元,在 99% 概率水平上, 100m^2 样地的 LAI 观测精度,分别可以保证在 91.2%、92.6%、93.7%、94.1%、94.3% 左右; $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 观测精度,分别可以保证在 76.5%、77.

5%、78.4%、79.2%、79.9% 左右; 1hm^2 样地的 LAI 观测精度,分别可以保证在 72.1%、73.5%、74.2%、74.7%、75.1% 左右。可见,在每个 25m^2 小样内,当随机 1m^2 取样数目达 11 个时,在 99% 概率水平上可以保证 1hm^2 样地的 LAI 观测精度达 75% 左右, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地的 LAI 观测精度可以保证在 80% 左右。

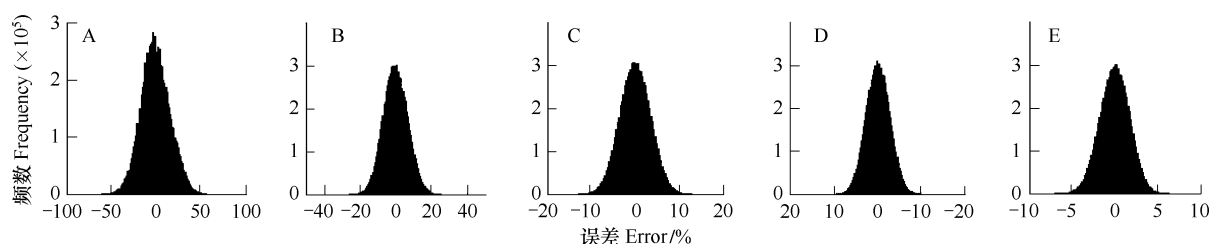


图 4 25m^2 小样内随机布设不同数量 1m^2 取样单元在 100m^2 内的误差-频数分布图

Fig. 4 Distribution of error-frequency in 100m^2 plot with different sampling units (1m^2) in each 25m^2 subplot

A、B、C、D、E 分别代表 1、4、6、8、11 个

综上,对于一个 1hm^2 或者 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 大小的天然林落叶林样地,森林叶面积指数快速测定可以这样取样:在其内部随机布设一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样地,将其划分为 4 个相邻 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 小样,①每个 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 小样内随机布设 6 个 1m^2 取样。这样的取样,可以在 99% 的概率水平上,保证 100m^2 内 LAI 观测精度达 90% 左右、 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地 LAI 观测精度可以保证在 75% 左右、 1hm^2 样地 LAI 观测精度约 70%。②若要获得更高的观测精度,可在每个 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 样地内随机布设 11 个 1m^2 取样。这样的取样,可以在 99% 的概率水平上保证 100m^2 内 LAI 观测精度近 95%、 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地 LAI 观测精度约 80%、 1hm^2 样地 LAI 观测精度约 75%。

3 结论

(1) 落叶阔叶林内落叶的分布是不均匀的,即使看上去比较均匀的林地。无论以 1m^2 还是 25m^2 的分辨率,落叶林 LAI 的空间变化均很大,并非一个轻微波动的表面。

(2) 落叶阔叶林叶面积指数的野外快速测定,可以通过样地落叶采集称重、取部分样叶测其 SLA 的方法进行。在选择样地时应注意:①应选择面积尽可能大、均质性较好的森林。这可减小不利因素对 LAI 测定的影响。② 应选择地势平坦的样地收集落叶。

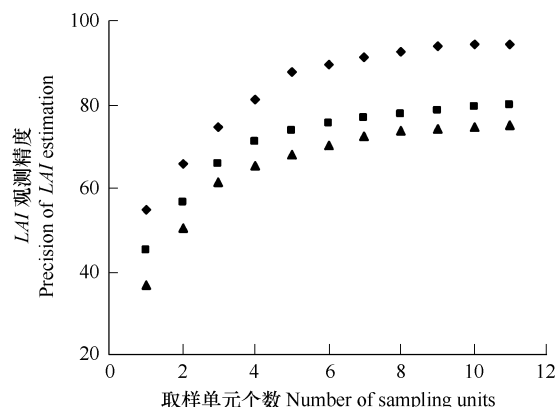


图 3 每个 25m^2 小样内随机布设不同数目 1m^2 取样的精度

Fig. 3 Precision of LAI estimation with different sampling units (1m^2) in each 25m^2 subplot

◆■▲ 分别代表 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样地, $30\text{m} \times 30\text{m}$ 样地, 1hm^2 样地

表 4 每个 25m²小样内布设不同数量 1m²取样单元在不同误差范围的随机取样次数(×10⁵, 100m²样地)Table 4 Random sampling number of the different sampling units (1 m²) in each 25 m² subplot with different error range of LAI estimation (×10⁵) in 100 m² plot

取样单元个数 Number of sampling units	误差范围 Error range/%										
	< -30	-30— -20	-20— -15	-15— -10	-10— -5	-5— 5	5— 10	10— 15	15— 20	20— 30	>30
1	6.41	7.51	8.44	15.9	32.64	36.37	27.34	11.5	7.29	6.76	5.46
2	2.7	3.56	4.1	9.35	29.96	75.51	23.7	7.79	4.43	2.92	1.6
3	0	1.67	2.21	5.81	21.82	108.15	18.57	3.56	2.4	1.43	0
4	0	0.61	1.25	2.91	16.47	126.52	15.01	1.82	1.03	0	0
5	0	0	0.32	1.82	12.15	138.85	11.55	0.93	0	0	0
6	0	0	0	1.1	8.93	146.75	8.27	0.57	0	0	0
7	0	0	0	0.41	5.83	154.31	5.03	0.04	0	0	0
8	0	0	0	0	3.48	158.95	3.19	0	0	0	0
9	0	0	0	0	2.13	161.72	1.77	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1.18	163.48	0.96	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0.96	163.88	0.78	0	0	0	0

(3) 落叶的收集 在落叶结束后,立即收集;若条件允许,也可分次收集。

(4) 落叶含水量的差异对 LAI 的观测精度影响很大:

①不同层次落叶的含水量差异显著 ($P < 0.05$), 上下两层之间落叶含水量的差异最高可达在 10% 以上, 因此,在野外采集样叶,应从上到下直至地面进行取样。

②落叶含水量的日变化显著,特别是在晴天。在晴天,落叶含水量在早晨与中午之间的差异最大可达 20% 以上。因此,在野外落叶取样时,如取样时间相隔较大,应根据观测间段增加样叶的采集次数。

(5) 收集落叶的样地面积越大,落叶林 LAI 的观测精度越高。对于一个 1hm² 或 30m × 30m 大小的样地,可通过随机布设一个 10m × 10m 小样地来快速观测。精度可达 80%、85% 左右。

(6) 全部测量 100m²样地的落叶费时费力。快速取样方法是:将其分为的 4 个相邻的 5m × 5m 小样地,①在每个 5m × 5m 小样地内随机布设 6 个 1m²取样。这可以保证在 99% 概率水平上 100m²内 LAI 观测精度约 90.0%、30m × 30m 样地 LAI 观测精度达 75.0% 左右、1hm² 样地 LAI 观测精度约 70.0% 左右。②在每个 5m × 5m 小样地内随机布设 11 个 1m²取样,这样的取样,在 99% 的概率水平上,100m²内 LAI 观测精度在 94.0% 左右、30m × 30m 样地 LAI 观测精度达 80.0% 左右、1hm² 样地 LAI 观测精度约 75.0%。

References:

- [1] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 153-162.
- [2] Hall R J, Davidson D P, Peddle D R. Ground and remote estimation of leaf area index in Rocky Mountain forest stands, Kananaskis, Alberta. Canadian Journal of remote Sensing, 2003, 29(3): 411-427.
- [3] Asner G P, Scurlock J M O, Hicke J A. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. Global Ecology & Biogeography, 2003, 12(3): 191-205.
- [4] Dahlberg U, Berge TW, Petersson H, Vencatasawmy C P. Modelling biomass and leaf area index in a sub-arctic Scandinavian mountain area. Scandinavian Journal of forest Research, 2004, 19(1): 60-71.
- [5] Sonnentag O, Talbot J, Chen J M, Roulet N T. Using direct and indirect measurements of leaf area index to characterize the shrub canopy in an ombrotrophic peatland. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 144(3): 200-212.
- [6] Davi H, Baret F, Huc R, Dufrêne. Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forests. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5): 890-899.

- [7] Nackaerts K, Coppin P, Muys B, Hermy M. Sampling methodology for LAI measurements with LAI-2000 in small foreststands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101 (4) : 247-250.
- [8] Kalácska M, Sánchez-Azofeifa G A, Rivard B, Calvo-Alvarado J C, Journet A R P, Arroyo-Mora J P, and Ortiz D. Leaf area index measurements in a tropical moist forest: A case study from Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91 (2) : 134-152.
- [9] Law B E, Tuyl S V, Cescatti A, Baldocchi D D. Estimation of leaf area index in open-canopy ponderosa pine forests at different successional stages and management regimes in Oregon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108 (1) : 1-14.
- [10] Eklundh L, Hall K, Eriksson H, Ardö J, Pilesjö. Investigating the use of Landsat thematic mapper data for estimation of forest leaf area index in southern Sweden. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29 (3) : 349-362.
- [11] Raffy M, Soudani K, Trautmann J. On the variability of the LAI of homogeneous covers with respect to the surface size and application. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24 (10) : 2017-2035.
- [12] Mencuccini M and Grace J. Climate influences the leaf area/sapwood area ratio in Scots pine. *Tree Physiology*, 1995, 15 (1) : 1-10.
- [13] White J, Running S, Nemani R, Keane R, Ryan K. Measurement and remote sensing of LAI in Rocky Mountain Montane ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27 (12) : 1714-1727.
- [14] Roberts S D, Dean T J, Evans D L. Family influences on leaf area estimates derived from crown and tree dimensions in *Pinus daeda*. *Forest Ecology and Management*, 2003, 172 (2) : 261-270.
- [15] Rautiainen M, Stenberg P, Nilson T, Kuusk A, Smolander H. Application of a forest reflectance model in estimating leaf area index of Scots pine stands using Landsat-7 ETM reflectance data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29 (3) : 314-323.
- [16] Zhang N, Yu G, Yu Z, Zhao S. Simulation of leaf area index and biomass at landscape scale. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13 (2) : 139-152.
- [17] Cutini A, Matteucci G, Mugnozza G S. Estimation of leaf area index with the Li-cor LAI-2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, 1998, 105 (1) : 55-65.
- [18] 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*, 1997, 102 (24) : 29429-29433.
- [19] Chen J M, Pavlic G, Brown L, Cihlar J, Leblanc S G, White H P, Hall R J, Peddle D R, King D J, Trofymow J A, Swift E, Pellikka P K E. Derivation and validation of Canadian-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80 (1) : 165-184.
- [20] Stenberg P, Nilson T, Smolander H, Voipio P. Gap fraction based estimation of LAI in Scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29 (3) : 363-370.
- [21] Johnson L F. Indirect measurement of leaf area index in California North coast vineyards. *HortScience*, 2004, 39 (2) : 236-238.
- [22] Xavier A C, Vettorazzi C A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in subtropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25 (9) : 1661-1672.
- [23] Frazer G W, Fournier R A, Trofymow J A, Hall R J. Comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109 (4) : 249-263.
- [24] Roberts D A, Ustin S L, Ogunjemiyo S, Greenberg J, Dobrowski S Z, Chen J M, Hinckley T M. Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. *Ecosystems*, 2004, 7 (15) : 545-562.
- [25] Hale S E, Edwards C. Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112 (1) : 51-56.
- [26] 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.
- [27] Gong P, Pu R, Biging G S, Larrieu M R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41 (6) : 1355-1362.
- [28] Hall R J, Fernandes R A, Hogg E G, Brandt J P, Butson C, Case B S, Leblanc S G. Relating aspen defoliation to changes in leaf area derived from field and satellite remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29 (3) : 299-313.
- [29] Garson D C, Lacaze B. Monitoring leaf area index of mediterranean oak woodland: comparison of remotely-sensed estimates with simulations from an ecological process-based model. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24 (17) : 3441-3456.
- [30] Richard A, Fernandes, John R, Miller, Chen J M, Irene G, Rubinstein. Evaluating image-based estimates of leaf area index in boreal conifer stands over a range of scales using high-resolution CASI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89 (2) : 200-216.
- [31] Ushada M, Murase H, Fukuda H. Non-destructive sensing and its inverse model for canopy parameters using texture analysis and artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 57 (2) : 149-165.

- [32] Maire G, François C, Soudani K, Berveiller D, Pontailler J, Bréda N, Genet H, Davi H, Dufrêne E. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10):3846-3864.
- [33] Bouriaud O, Soudani K, Bréda N. Leaf area index from litter collection: impact of specific leaf area variability within a beech stand. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(3):371-380.
- [34] Castro-Diez P, Villar-Salvador P, Pérez-Rontomé C, Maestro-Marinez M, Montserrat-Marti G. Leaf morphology and leaf chemical composition in three *Quercus* (Fagaceae) species along a rainfall gradient in NE Spain. *Trees*, 1997, 11(3):127-134.
- [35] Abrams M D, Mostoller S A. Gas exchange and leaf structure and nitrogen in contrasting successional tree species growing in open and understory sites during a drought. *Tree Physiology*, 1995, 15(4):361-370.
- [36] Jose S, Gillespie R. Leaf area-productivity relationships among mixed-species hardwood forest communities of the Central Hardwood region. *Forest Science*, 1997, 43(2):56-64.
- [37] Hobbie S E. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during litter decomposition in a Hawaiian montane forest. *Ecosystems*, 2000, 3:63-72.
- [38] Clough B, Tan D T T, Phuong D X, Buu D C. Canopy leaf area index and litter fall in stands of the mangrove *Rhizophora apiculata* of different age in the Mekong Delta, Vietnam. *Aquatic Botany*, 2000, 66(4):311-320.
- [39] Nasahara K N, Muraoka H, Nagai S, Mikami H. Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6):1136-1146.
- [40] Eriksson H, Eklundh L, Hall K, Lindroth A. Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(1):27-37.