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

周 明^{1,2} 刘志理¹ 金光泽^{1*}

¹东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040; ²佳木斯市林业局, 黑龙江佳木斯 154007

摘 要 木质部和集聚效应是影响间接法测定叶面积指数(LAI)精度的主要因素, 尤其是木质部的校正一直存在争议。针对这一问题, 该研究首先利用半球摄影法(DHP)和LAI-2000植物冠层分析仪法(LAI-2000法) 2种间接法测定了小兴安岭兴安落叶松(*Larix gmelinii*)人工林叶面积最大时期的有效LAI (L_e), 然后提出了A、B、C 3种校正方案来提高间接法的测定精度。同时, 利用凋落物法和异速生长方程法2种直接法测定LAI, 以凋落物法测定值为标准来评估3种校正方案的校正效果, 并检验天顶角范围对校正结果是否存在显著影响。结果表明: 在0–45° (1–3环)、0–60° (1–4环)、45°–60° (4环)及0–75° (1–5环) 4种不同天顶角范围内, DHP测定的 L_e 比凋落物法、异速生长方程法测定值分别低估19%–32%和8%–29%; 而LAI-2000法也得到相似的结论, 分别低估9%–30%和8%–28%。虽然校正方案A高估了木质部对LAI的贡献, 但在45°–60°天顶角范围内, 能有效地校正DHP测定的 L_e , 在1–3环和1–4环天顶角范围内, 能有效地校正LAI-2000法测定的 L_e 。4种天顶角范围内, 校正方案B均能有效地校正DHP测定的 L_e 。整体来看, 4种天顶角范围内, 校正方案C对DHP和LAI-2000法测定值的校正效果均优于其他2种方案。研究结果表明除木质部和集聚效应外, 天顶角范围的选择也是决定间接法测定LAI精度的重要因素。

关键词 叶面积指数; 凋落物法; 异速生长方程法; 半球摄影法; LAI-2000植物冠层分析仪法; 天顶角

引用格式: 周明, 刘志理, 金光泽 (2016). 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, 40, 574–584. doi: 10.17521/cjpe.2015.0467

Improving the accuracy of indirect methods in estimating leaf area index using three correction schemes in a *Larix gmelinii* plantation

ZHOU Ming^{1,2}, LIU Zhi-Li¹, and JIN Guang-Ze^{1*}

¹Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; and ²Forestry Bureau of Jiamusi, Jiamusi, Heilongjiang 154007, China

Abstract

Aims Woody materials and clumping effects are key error sources in estimating leaf area index (LAI) by optical methods. However, how to correct the error caused by woody materials has not reached consensus. The aims of this study are (1) to evaluate the accuracy of optical methods for estimating effective LAI (L_e) in a deciduous needle leaf forest stand, and (2) to develop a practical correction scheme to improve the accuracy of optical methods in estimating LAI.

Methods L_e was estimated by two indirect methods (i.e., digital hemispherical photography (DHP) and LAI-2000 plant canopy analyzer method (LAI-2000 method) in an annual maximum leaf area period in a *Larix gmelinii* plantation. Then, we developed three correction schemes to improve the accuracy of indirect methods in estimating LAI. Meanwhile, two direct methods (i.e., litter collection and allometry methods) were used to estimate LAI. Taking LAI from litter collection as a reference, we evaluated the effectiveness of three correction schemes and tested the influence of zenith angle ranges on the correction results.

Important findings With zenith angle ranges of 0–45° (rings 1–3), 0–60° (rings 1–4), 45°–60° (ring 4) and 0–75° (rings 1–5), L_e obtained from DHP underestimated LAI from both litter collection and allometry by 19%–32% and 18%–29%, respectively. L_e from LAI-2000 method with four zenith angles also underestimated LAI from both litter collection and allometry by 9%–30% and 8%–28%, respectively. Although the contribution of woody materials to LAI was overestimated in correction scheme A, it was effective in correcting L_e from DHP with zenith

收稿日期Received: 2015-12-21 接受日期Accepted: 2016-05-09

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: taxus@126.com)

angles of 45°–60° (ring 4), and also effective for L_e from LAI-2000 method with zenith angles of rings both 1–3 and 1–4. Correction scheme B was all effective in correcting L_e from DHP with four zenith angle ranges. Generally, correction scheme C was more effective than other two schemes in correcting L_e from both DHP and LAI-2000 method with four zenith angle ranges. These results indicate that the zenith angle range is a key factor for determining the accuracy of optical methods in estimating LAI besides woody materials and clumping effects.

Key words leaf area index; litter collection; allometry; digital hemispherical photography; LAI-2000 plant canopy analyzer method; zenith angle

Citation: Zhou M, Liu ZL, Jin GZ (2016). Improving the accuracy of indirect methods in estimating leaf area index using three correction schemes in a *Larix gmelinii* plantation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 574–584. doi: 10.17521/cjpe.2015.0467

叶面积指数(LAI)通常定义为单位地面面积上总绿叶表面积的一半(Chen & Black, 1992)。LAI是无量纲参数, 主要用于量化林冠层中叶量的多少(Bréda, 2003)。LAI对于植物光合速率、蒸腾速率以及碳、水在冠层和大气间的交换至关重要(Chen *et al.*, 1999; Galia Selaya *et al.*, 2008; Maseyk *et al.*, 2008)。此外, LAI还是模拟净初级生产力和林木生长等许多生理生态过程的关键参数(Saigusa *et al.*, 2002; Luo *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2014)。因此, 如何快捷、准确地测定森林生态系统的LAI备受关注。

破坏性取样法(Gower & Norman, 1991)、异速生长方程法(Jonckheere *et al.*, 2005; Mason *et al.*, 2012)、凋落物法(Nasahara *et al.*, 2008; 郝佳等, 2012; 刘志理等, 2014)及斜点样方法(任海和彭少麟, 1997)4种直接法经常用于测定森林生态系统叶面积最大时期的LAI。直接法测定的LAI通常认为是真实值, 常用于校准其他方法测定值, 但直接法费时费力, 尤其前2种方法不仅具有破坏性, 而且受地域、林分密度等许多因素的限制(Gower *et al.*, 1993; Chen, 1996)。相对而言, 基于光学仪器观测到林冠结构参数, 再通过反演可间接得到LAI, 这种间接法因方便、高效, 在LAI的测定中得到了广泛应用和发展(Bréda, 2003; 曾小平等, 2008; Thimonier *et al.*, 2010)。然而, 间接法(光学仪器法)因自身局限性受测定精度的制约, 因此, 通常把光学仪器法直接测定的LAI称为有效LAI (L_e)(Chen *et al.*, 1997)或有效植被面积指数(plant area index, PAI)(邹杰和阎广建, 2010; Fang *et al.*, 2014)。对于针叶林, 影响间接法测定LAI精度的因素主要包括木质部, 冠层水平上的集聚效应和簇内集聚效应, 其分别利用木质指数(WAI), 集聚指数(Ω_E)和针簇比(γ_E) 3个参数来校正, 即根据下式可得到相对准确的LAI (Chen *et al.*, 1997):

$$LAI = (1 - \alpha)L_e \frac{\gamma_E}{\Omega_E} \quad (1)$$

式中 α 为木质比例(woody-to-total area ratio), 即木质部的面积占总面积(包括叶片和木质部)的比例。相对于 Ω_E 和 γ_E , 如何有效地校正木质部产生的误差一直存在争议。

对于落叶林, 经常用背景值法校正光学仪器法测定LAI时因木质部产生的误差(Cutini *et al.*, 1998; Eriksson *et al.*, 2005)。背景值法指在无叶期, 通过直接法或间接法测定林冠的LAI, 此时的LAI可认为都是木质部的贡献, 即为WAI, 然后假设有叶期内该WAI对LAI的贡献不变, 利用总LAI (叶片和木质部产生的LAI)直接减去WAI来校正木质部产生的误差(Kucharik *et al.*, 1998; Zou *et al.*, 2009)。因此, 在落叶阔叶林内, 通常利用下式来校正光学仪器法测定的 L_e (Eriksson *et al.*, 2005):

$$LAI = L_e / \Omega_E - WAI \quad (2)$$

落叶阔叶林内, γ_E 值为1.0, 因此, L_e / Ω_E 可得到总LAI, 或称为PAI。同理, 在落叶针叶林内, 可利用下式来校正 L_e :

$$LAI = L_e \gamma_E / \Omega_E - WAI \quad (3)$$

然而, 许多学者指出: 在生长季节, 尤其是叶面积最大时期, 背景值法会高估木质部对LAI的贡献, 因为随着叶片的生长及叶量的增多, 部分木质部被新生叶遮蔽, 从而减小木质部对LAI的贡献(Dufrène & Bréda, 1995; Kucharik *et al.*, 1998)。此外, 光学仪器无法区分木质部和叶片, 因此, L_e 是叶片和木质部共同产生的(Chen, 1996)。而对于落叶针叶林, 公式(3)中 $L_e \gamma_E / \Omega_E$ 在校正叶片产生的LAI的同时也校正了木质部, 然而, 通常认为木质部不存在簇内集聚效应, 因此, 公式(3)中对木质部的校正会产生一定的偏差。在落叶针叶林内这种偏差是否对最终的校正结果产生显著影响尚未得到评估。

WAI通常包含树干指数(SAI)和树枝指数(BAI)。也有研究表明叶面积最大时期木质部对LAI的贡献主要来源于树干,而树枝对LAI的贡献可忽略(Kucharik *et al.*, 1998)。Liu等(2015c)的研究结果也表明在落叶阔叶林内校正光学仪器法在测定LAI因木质部产生的误差时只考虑SAI的效果优于WAI,即将公式(2)转变为:

$$LAI = L_e/\Omega_E - SAI \quad (4)$$

同理,在落叶针叶林内,公式(3)可转变为:

$$LAI = L_e\gamma_E/\Omega_E - SAI \quad (5)$$

然而,这种校正方案的有效性也尚未得到评估。除以上3个因素影响光学仪器法测定LAI的精度外,天顶角的范围对计算LAI也存在一定的影响(Dufrêne & Bréda, 1995; Macfarlane *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2015b)。以往研究中利用光学仪器法计算LAI时通常采用的天顶角范围为0–45° (Chen *et al.*, 2006), 0–60° (Eriksson *et al.*, 2005), 0–75° (Behera *et al.*, 2010), 30°–60° (Walter & Jonckheere, 2010), 45°–60° (Eriksson *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2015a), 57.5° (Leblanc *et al.*, 2005)等。然而,关于落叶针叶林内天顶角范围是否对校正 L_e 存在显著影响的研究尚少。

兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林主要分布在大兴安岭地区,在小兴安岭地区成片段分布。黑龙江凉水国家级自然保护区地处小兴安岭南部达里带岭支脉的东坡,该区域基本为兴安落叶松林分布的最南界(中国森林编辑委员会, 1997)。本研究以自然保护区内的兴安落叶松人工林为研究对象,利用2种直接法和2种间接法测定了其叶面积最大时期的LAI,方法分别为:凋落物法、异速生长方程法、半球摄影法(DHP)和LAI-2000植物冠层分析仪法(简称LAI-2000法)。具体研究目标包括:(1)以直接法测定值为标准,评估不同天顶角范围内DHP和LAI-2000法的测定精度;(2)为提高光学仪器法的测定精度,提出3种校正方案,并对其校正效果进行评估,以期更系统地了解影响光学仪器法测定落叶针叶林LAI精度的限制因素。研究结果可为快速、准确地测定落叶针叶林的LAI提供技术支持,并为科学地管理兴安落叶松林提供参考和依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况与样地设置

试验样地设置在黑龙江凉水国家级自然保护区

(47.18° N, 128.89° E),该区域地形比较复杂,最高山峰海拔707 m。该地区属温带大陆性季风气候,年平均气温–0.3 °C,最高年平均气温7.5 °C,最低年平均气温–6.6 °C;年降水量676 mm,降水集中在7月;年积雪期130–150天,年无霜期100–120天。

2009年在保护区的16林班的27小班设置3个20 m × 30 m的兴安落叶松人工林固定样地,此小班是当地地带性顶极植被——阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林被皆伐后于1954年在皆伐迹地上人工种植的兴安落叶松人工林。将每个样地划分成6个10 m × 10 m的小样方,对样方内所有胸径≥1 cm的物种进行每木检尺调查,测定其树种、胸径、坐标等,并于2013年进行了复查(样地的物种组成见表1)。每个小样方内随机设置1个凋落物收集器,共计18个。凋落物收集器用径粗8 mm的铁丝和尼龙网围成(孔径1 mm,深0.5–0.6 m),网口为正方形(边长为0.7 m),面积约为0.5 m²,凋落网底离地面约0.5 m(刘志理等, 2014)。

1.2 数据采集

2014年8月1日至11月1日,每两周收集一次凋落物,由图1可推断兴安落叶松人工林的LAI约在8月初达到最大值。2014年5月初(无叶期)及8月初分别利用DHP和LAI-2000法2种光学仪器法测定每个样点(共计18个)的 L_e ,样点选择在凋落物收集器附近。

1.3 直接法测定叶面积指数

1.3.1 凋落物法

以凋落物收集器为单位,将每次收集的凋落叶按树种进行分类、烘干并称质量,累加8月至11月的凋落叶干质量,结合各树种的比叶面积除以凋落物收集器的面积即可得到8月初各树种的LAI,综合各树种,即得到各样点的LAI。

1.3.2 异速生长方程法

以10 m × 10 m的小样方为单位,基于2013年各树种的每木检尺数据,根据叶生物量(叶干质量)和胸径间的异速生长方程计算出小样方内各树种的总叶干质量,然后结合其比叶面积,得出各树种的总叶面积,综合各树种的总叶面积除以小样方的面积,即可得到每个小样方的LAI。本研究中忽略1年中各树种LAI的生长量,即将2013年的LAI值当作2014年的LAI值进行对比分析。

1.4 间接法测定叶面积指数

1.4.1 DHP

DHP采用Winscanopy2006冠层分析仪(Regent,

表1 兴安落叶松人工林的物种组成及主要树种的比叶面积和叶生物量方程

主要树种 Dominant species	密度 Stem density (individuals·hm ⁻²)	平均胸径 Mean DBH (cm)	胸高断面积 Basal area (m ² ·hm ⁻²)	相对优势度 Relative dominance (%)	比叶面积 ¹⁾ SLA ¹⁾ (cm ² ·g ⁻¹)	叶生物量方程 ²⁾ Allometric equations for leaf biomass ²⁾ $B_{\text{leaf}} = aDBH^b$	
						<i>a</i>	<i>b</i>
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	350	28.93	24.29	84.49	134.23	0.014	3.934
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	156	9.50	2.15	7.47	338.36	8.570	2.180
色木槭 <i>Acer mono</i>	294	5.81	1.01	3.50	305.04	17.179	1.948
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	239	5.62	0.72	2.50	243.59	1.694	2.507
其他 Others	261	4.92	0.59	2.05	—	—	—
总计 Total	1 300	13.25	28.75	100.00	—	—	—

胸高断面积指单位面积内所有树木1.3 m处横断面积的总和。 B_{leaf} , 叶生物量, 即叶干质量(g); DBH , 胸径。1)数据引自Liu等(2015a); 2)数据引自Wang (2006)。
Basal area is the total cross-sectional areas at the height of 1.3 m of trees per unit area. B_{leaf} , leaf biomass, i.e., leaf dry mass (g); DBH , diameter at breast height. 1) data reported by Liu *et al.* (2015a); 2) data reported by Wang (2006).

图1 兴安落叶松人工林凋落物收集器内凋落叶总干质量的动态变化(平均值±标准误差)。
Fig. 1 Seasonal changes of total leaf litter dry mass in litter traps in the *Larix gmelinii* plantation (mean ± SE).

Instruments, Quebec, Canada)采集半球摄影图像, 冠丛分析仪主要由数码相机(Coolpix 4500, Nikon, Tokyo, Japan)和180°鱼镜头(Nikon FC-E8)组成。数码相机利用三脚架固定在离地面1.3 m处, 为避免直射光对图像采集产生影响, 每次图像采集在阴天或日出和日落前后进行, 采集时相机保持水平, 曝光设置参照Zhang等(2005)的文献, 即先测定样地外空旷处的曝光速率(如1/1000 s), 然后在林内采集数据时将曝光速率调慢两档(如1/250 s), 且光圈设置不变。数据采用DHP 4.5软件处理, 计算时天顶角范围选择4种不同方案: 0–45°、0–60°、45°–60°及0–75°。

1.4.2 LAI-2000法

LAI-2000 (LI-COR, Lincoln, USA)采集的数据与DHP采集时间、地点相同, 采集数据时确保感应探头离地面1.3 m且保持水平, 使用90°顶盖; 每次测定的初始值和结束值, 即天空空白值均采自样地附近的防火瞭望塔上。数据采用FV2200软件处理, 为与DHP数据对比分析, 天顶角选择相似范围: 1–3环(0–45°)、1–4环(0–60°)、4环(45°–60°)及1–5环(0–75°)。

1.4.3 光学仪器法的校正

针叶林内, 影响光学仪器法测定LAI精度的因素主要包括木质部和集聚效应(Chen *et al.*, 1997), 对如何校正木质部产生的偏差仍存在争议。以往研究中, 背景值法经常用于校正落叶林中木质部产生的偏差(Kucharik *et al.*, 1998; Zou *et al.*, 2009), 即利用光学仪器法在无叶期测定的LAI可认为是有效WAI (WAI_e), 若假设木质部不存在集聚效应, WAI_e 即为WAI。也有学者指出LAI最大时期, 树枝因被树叶遮蔽, 其对LAI的贡献可忽略, 此时只考虑树干对LAI的贡献更合理(Kucharik *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2015c)。为进一步合理校正针叶林内木质部产生的偏差, 本研究引入一个新的校正参数, 树干比例(stem-to-total area ratio, α_{stem}), 即树干面积占总面积(木质部和叶片产生的面积)的比例。

首先, 因忽略木质部的集聚效应, 可根据下式计算 α 值:

$$\alpha = \frac{WAI_e}{L_e} = \frac{WAI}{L_e} \tag{6}$$

同理, 根据下式可得到 α_{stem} :

表2 兴安落叶松人工林内3种校正方案中木质部和集聚效应(冠层水平上的集聚效应和簇内集聚效应)的校正参数及其生态学特性
Table 2 Correction parameters and its ecological characteristics for woody materials and clumping effects (clumping effects both beyond and within shoots) in three correction schemes in the *Larix gmelinii* plantation

校正方案 Correction scheme	校正公式 Correction equa- tion	木质部 Woody materials	冠层水平上的集聚效应 Clumping effects beyond shoots	簇内水平上的集聚效应 Clumping effects within shoots	生态学特性 Ecological characteristics
校正方案A Correction scheme A	$LAI = L_e \gamma_E / \Omega_E - WAI$	WAI, 通过光学仪器法 在无叶期测定 WAI, which was meas- ured by optical methods in leafless periods	Ω_E , 基于Chen和Cihlar (1995)提出的CC法, 通过 DHP-TRAC软件获得, 计算 时选择40°–45°天顶角 Ω_E , which was obtained through DHP-TRAC soft- ware based on CC method developed by Chen and Cihlar (1995), with zenith angles of 40°–45°	γ_E , 测定兴安落叶松的 γ_E , 然后 根据小样方内兴安落叶松和其 他阔叶树种的胸高断面面积进行 加权, 得到各样点林分水平上 的 γ_E 值 γ_E , γ_E for <i>Larix gmelinii</i> was first measured, and the γ_E for the stand was obtained by weighting γ_E for <i>Larix gmelinii</i> and other broadleaf species based on the basal area	未考虑木质部对LAI贡献率的季 节变异, 且过度校正了木质部 的集聚效应 Ignoring seasonal variations of the contribution of woody mate- rials to LAI, and overestimated the clumping effects of woody materials
校正方案B Correction scheme B	$LAI = L_e \gamma_E / \Omega_E - SAI$	SAI, 利用WAI乘以SAI 占WAI的比例获得, 比 例值为0.2 (Liu <i>et al.</i> , 2015b) SAI, which was calcu- lated by multiplying WAI by the ratio of SAI to WAI. The ratio was 0.2 (Liu <i>et al.</i> , 2015b)	同校正方案A Same as correction scheme A	同校正方案A Same as correction scheme A	一定程度上校正了木质部对LAI 贡献率的季节变异, 过度校正 了木质部的集聚效应 Slightly correcting seasonal variations of the contribution of woody materials to LAI, but also overestimated the clumping effects of woody materials
校正方案C Correction scheme C	$LAI = L_e \frac{(1 - \alpha_{stem}) \gamma_E}{\Omega_E}$	α_{stem} , 用SAI除以 L_e 获得 α_{stem} , which was calcu- lated by SAI divided by L_e	同校正方案A Same as correction scheme A	同校正方案A Same as correction scheme A	合理校正了木质部对LAI的贡献 率, 避免过度校正木质部的集 聚效应 Reasonably correcting seasonal variations of the contribution of woody materials to LAI, and avoid over estimating the clump- ing effects of woody materials

$$\alpha_{stem} = \frac{SAI}{L_e} \tag{7}$$

将公式(3)和(7)合并得到:

$$LAI = L_e \frac{(1 - \alpha_{stem}) \gamma_E}{\Omega_E} \tag{8}$$

基于以上校正木质部产生偏差的3种情况, 本研究提出3种不同校正方案(表2)用于提高间接法测定LAI的精度, 同时检验天顶角范围对LAI的影响, 即3种校正方案适用于不同的天顶角范围。因为异速生长方程法受地域限制, 所以将凋落物法测定的LAI值作为标准, 来评估校正方案的校正效果。

1.5 数据分析

利用配对样本t检验来评估凋落物法和异速生长方程法测定的主要树种及整个林分水平上的LAI间是否存在显著性差异($\alpha = 0.05$)。在0–45° (1–3环), 0–60° (1–4环), 45°–60° (4环)及0–75° (1–5环) 4种不同天顶角范围内, 分别对DHP和LAI-2000法测定的 L_e 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($\alpha = 0.05$)。同样, 在不同天顶角范围内, 利用LSD检验DHP和LAI-2000法测定的 L_e 经过不同校正方案校正后的值与凋落物法测

定值间的差异显著性($\alpha = 0.05$)。

2 结果

2.1 两种直接法测定的叶面积指数的比较

对于兴安落叶松人工林, 凋落物法和异速生长方程法测定的LAI间不存在显著差异, 其值分别为5.65和6.56 (图2)。对于树种而言, 2种方法测定的4种主要树种的LAI间均不存在显著差异, 且兴安落叶松的LAI最大, 这主要源于该树种的相对优势度远高于其他树种(表1)。而凋落物法测定的其他树种的LAI显著高于异速生长方程法测定值($p < 0.05$)。

2.2 两种间接法测定的有效叶面积指数的比较

对于DHP, 45°–60°天顶角范围内的 L_e 显著高于其他范围测定值($p < 0.05$), 其均值为4.33 ($SD = 0.58$); 0°–45°范围内的值最小, 均值为3.72 ($SD = 0.31$)。不同天顶角范围内, DHP测定的 L_e 均低于凋落物法测定值, 低估范围(即与凋落物法LAI的差异范围)为19%–32%, 也低于异速生长方程法测定值, 低估范围为18%–29% (表3)。对于LAI-2000法, 1–3环天顶角范围内 L_e 值最大, 均值为4.96 ($SD = 1.18$), 与1–4环值无显著差异, 但显著高于4环值和1–5环值($p < 0.05$)。

图2 凋落物法和异速生长方程法测定的叶面积指数(平均值±标准偏差)的比较。同一树种内的不同小写字母表示凋落物法和异速生长方程法计算的叶面积指数在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。
Fig. 2 Comparison of leaf area index (LAI) from litter collection and allometry (mean $\pm$ SD). Different lowercase letters for the same species indicated a significant difference among LAI from litter collection and allometry at the 0.05 level. Am, *Acer mono*; Fm, *Fraxinus mandschurica*; Lg, *Larix gmelinii*; Ta, *Tilia amurensis*.

不同天顶角范围内, LAI-2000法测定的 L_e 均低于凋落物法测定值, 低估范围为9%–30%; 也均低于异速生长方程法测定值, 低估范围为8%–28% (表3)。

2.3 光学仪器法的校正参数

对于DHP和LAI-2000法, 不同天顶角范围内, α_{stem} 值均没有明显差异, 其变化范围分别为7%–8%和7%–10%。然而, LAI-2000法测定的 α_{stem} 值在各样点间的变异程度明显高于DHP, 不同天顶角范围内CV

值的变化范围分别为31%–34%和7%–14% (表4)。不同样点间的 Ω_E 值变异范围较小, CV值为3%, Ω_E 的均值为0.89。各样点间 γ_E 的均值为1.33, CV值为15% (表4)。

2.4 比较直接法和间接法测定的叶面积指数

0–45° (1–3环)天顶角范围内, 校正方案A对LAI-2000测定的 L_e 的校正效果优于DHP, 而校正方案B和C对DHP测定的 L_e 的校正效果优于LAI-2000法(图3)。0–60° (1–4环)天顶角范围内, 校正方案C的校正效果优于其他2种方案, 即DHP和LAI-2000法测定的 L_e 经过校正方案C校正后与凋落物法测定值均不存在差异(图3)。45°–60° (4环)和0–75° (1–5环)天顶角范围, 校正方案B和C的校正效果相同, 均优于校正方案A。

虽然校正方案A高估了木质部对LAI的贡献, 但只要合理选择天顶角, 仍能有效地校正DHP和LAI-2000法测定的 L_e , 表明天顶角也是影响光学仪器法测定LAI精度的关键因素。校正方案B更适于校正DHP测定的 L_e , 不同天顶角范围内的校正值与凋落物法测定值均不存在显著差异。整体来看, 不同天顶角范围内校正方案C对DHP和LAI-2000法测定值的校正效果优于其他2种校正方案, 表明校正过程中考虑因木质部对LAI贡献的季节变异及过度校正木质部的集聚效应而产生的偏差十分必要。

3 讨论

凋落物法和异速生长方程法是测定不同森林

表3 比较不同天顶角范围内半球摄影法(DHP)和LAI-2000植物冠分析仪法(LAI-2000法)测定的有效叶面积指数及其与直接法(凋落物法和异速生长方程法)测定值间的差异

Table 3 Comparison of effective leaf area index (L_e) from digital hemispherical photography (DHP) and LAI-2000 plant canopy analyzer method (LAI-2000 method) with different zenith angles and differences between these values and leaf area index (LAI) from direct methods (litter collection and allometry)

数值 Value	0–45° (1–3环 Rings 1–3)		0–60° (1–4环 Ring 1–4)		45°–60° (4环 Ring 4)		0–75° (1–5环 Rings 1–5)	
	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method
最大值 Maximum	4.25	7.03	4.27	5.87	5.25	5.83	4.39	5.83
最小值 Minimum	3.03	2.96	3.4	2.54	3.13	2.20	3.44	2.45
平均值 Mean	3.72 ^c	4.96 ^A	3.89 ^{bc}	4.42 ^{AB}	4.33 ^a	3.80 ^B	4.04 ^b	4.11 ^B
标准偏差 Standard deviation	0.31	1.18	0.2	1.07	0.58	1.15	0.28	0.98
与凋落物法LAI的差异 Difference with LAI from litter collection (%)	32	9	28	18	19	30	25	24
与异速生长方程法LAI的差异 Difference with LAI from allometry (%)	29	8	26	17	18	28	23	24

与凋落物法LAI的差异(%) = (凋落物法测定的LAI – DHP或LAI-2000法测定的 L_e)/凋落物法测定的LAI $\times$ 100; 与异速生长方程法LAI的差异(%) = (异速生长方程法测定的LAI – DHP或LAI-2000法测定的 L_e)/异速生长方程法测定的LAI $\times$ 100。不同小写字母表示不同天顶角范围内DHP测定的 L_e 在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著; 不同大写字母表示不同天顶角范围内LAI-2000法测定的 L_e 在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。
Difference with LAI from litter collection (%) = (LAI from litter collection – L_e from DHP or LAI-2000 method)/LAI from litter collection $\times$ 100; Difference with LAI from allometry (%) = (LAI from allometry – L_e from DHP or LAI-2000 method)/LAI from allometry $\times$ 100. Different lowercase letters meant significant difference among L_e from DHP with different zenith angles at the 0.05 level; Different capital letters meant significant difference among L_e from LAI-2000 method with different zenith angles at the 0.05 level.

表4 兴安落叶松人工林不同天顶角范围内的树干比例及集聚指数和针簇比
Table 4 Stem-to-total area ratio (α_{stem}) within different zenith angles, clumping index (Ω_E) and needle-to-shoot area ratio (γ_E) in the *Larix gmelinii* plantation

数值 Value		树干比例 α_{stem} (%)								集聚指数 Ω_{E}	针簇比 γ_{E}
		0–45°		0–60°		45°–60°		0–75°			
		(1–3环 Rings 1–3)		(1–4环 Ring 1–4)		(4环 Ring 4)		(1–5环 Rings 1–5)			
		DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method	DHP	LAI-2000法 LAI-2000 method		
最大值	Maximum	11	11	9	13	9	17	8	13	0.91	1.79
最小值	Minimum	6	5	7	5	6	6	7	6	0.84	1.03
平均值	Mean	8	7	8	8	7	10	7	9	0.89	1.33
标准偏差	Standard deviation	1	2	1	3	1	3	1	3	0.02	0.18
变异系数	Coefficient of variation (%)	13	32	10	31	14	34	7	32	3	15

DHP, 半球摄影法; LAI-2000法, LAI-2000植物冠丛分析法。
DHP, digital hemispherical photography; LAI-2000 method, LAI-2000 plant canopy analyzer method.

图3 经过不同校正方案校正后不同天顶角范围内半球摄影法(DHP)和LAI-2000植物冠丛分析法(LAI-2000法)测定的有效叶面积指数(LAI)和凋落物法测定的LAI (平均值±标准偏差)。校正方案A、B、C同表2。同一校正方案内的不同小写字母表示不同方法测定的叶面积指数间在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。

Fig. 3 Effective leaf area index (LAI) after corrected by different correction schemes within different zenith angles for digital hemispherical photography (DHP) and LAI-2000 plant canopy analyzer method (LAI-2000 method) and LAI from the litter collection method (mean $\pm$ SD). Correction scheme A, B and C see Table 2. Different lowercase letters with the same correction scheme meant significant difference among LAI from different methods at the 0.05 level.

类型叶面积最大时期LAI时常用的直接法, 而对比分析2种直接法测定值的研究较少。本研究对比分析了这2种直接法测定的小兴安岭兴安落叶松人林叶

面积最大时期的LAI, 结果显示主要树种和整个林分水平上2种方法测定的LAI均不存在显著差异, 表明异速生长方程法虽然受构建方程样本树所在地域

的限制(Gower *et al.*, 1993), 但只要运用合理, 仍具有较广泛的适用性。异速生长方程法虽然具有破坏性、且费时费力, 但其可避免重复工作。凋落物法虽然不具有破坏性, 但需要定期收集凋落物, 且需将凋落叶进行鉴别、分类, 并称质量, 也需要耗费较大的人力物力(Ishihara & Hiura, 2011; 刘志理和金光泽, 2015)。可见, 每种方法均具有各自的优势, 同时也具有一定的局限性。

DHP和LAI-2000法因能同时计算不同天顶角范围内的LAI而被广泛应用(陈厦和桑卫国, 2007; 苏宏新等, 2012)。这2种方法计算的LAI因天顶角不同均存在差异, 如对于DHP, 45°–60°天顶角范围内的 L_e 显著高于其他范围的 L_e 值, 其中与0–45°范围内的值差异最大(15%); 对于LAI-2000法, 1–3环天顶角范围内的 L_e 显著高于4环和1–5环值, 分别高23%和15%。其他学者也进行了类似的对比分析, 如Liu等(2015b)报道在阔叶红松林内DHP测定的45°–60°天顶角范围内的 L_e 比0–75°的值高15%; 对于LAI-2000法, Liu等(2015b)报道1–3环和1–5环天顶角范围内的 L_e 差异最大为15%; Chen等(2006)得到6种不同森林类型内1–3环和1–5环间的 L_e 的差异为16%; Richardson等(2011)报道该差异为20%。这些研究表明天顶角对DHP和LAI-2000法测定LAI至关重要, 在今后研究中应给予更多关注。

DHP和LAI-2000法测定的 L_e 均低于直接法测定值(表3)。对于DHP, 马泽清等(2008)报道在湿地松(*Pinus elliottii*)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林内, 0–60°内的 L_e 比异速生长方程法测定值分别低估68%、61%和57%; 王宝琦等(2014)报道在红松人工林内, 30°–60°内的 L_e 比凋落物法测定值平均低估75.5%; 而这些低估程度明显高于本研究中的低估程度(表3), 可能主要源于本研究中考虑了曝光设置对DHP测定LAI的影响, 因为在林内使用自动曝光或曝光过度的情况下, 易导致叶片变亮而使得光学仪器无法辨别, 进而低估LAI。相对而言, 本研究中LAI-2000法测定的 L_e 比直接法测定值的低估程度与其他研究结果相符。如郝佳等(2012)报道在华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林内LAI-2000法测定的 L_e 比凋落物法测定值平均低估29%; Mason等(2012)报道新西兰松树林内LAI-2000法测定的 L_e 比异速生长方程法测定值低估30%–60%。刘志理和金光泽(2014)报道在谷地

云冷杉林内LAI-2000法测定的 L_e 比凋落物法测定值低估15%–26%。整体来看, DHP和LAI-2000法测定的 L_e 均比直接法测定值低估的现象主要源于光学仪器法在计算LAI时忽略了冠层中的集聚效应, 尤其针叶林, 不仅存在冠层水平上的集聚效应, 而且存在簇内集聚效应(Chen *et al.*, 1997)。

木质部和集聚效应是影响光学仪器法测定LAI精度的主要因素已得到普遍认可(Chen *et al.*, 1997; Bréda, 2003), 然而本研究的结果表明天顶角范围的选择对LAI的精度也至关重要。对于落叶林, 背景值法是校正光学仪器法测定LAI时因木质部产生的误差最常用的方法(Kucharik *et al.*, 1998), 同时很多研究表明在叶面积最大时期背景值法会高估木质部对LAI的贡献(Dufrêne & Bréda, 1995)。然而, 本研究表明即便背景值法(校正方案A)会高估木质部对LAI的贡献, 若是合理选择天顶角范围, 仍能有效、准确地测定LAI, 如在45°–60°天顶角范围内, DHP测定的 L_e 经过校正方案A校正后与凋落物法测定值不存在显著差异, 在1–3环和1–4环天顶角范围内, LAI-2000法测定的 L_e 经过校正方案A校正后与凋落物法测定值均不存在显著差异, 表明天顶角对LAI的影响大于背景值法导致的高估木质部对LAI贡献的部分。也有学者指出, 叶面积最大时期, 木质部对LAI的贡献主要体现在树干上, 而树枝因基本被叶片遮蔽使其对LAI的贡献可忽略(Kucharik *et al.*, 1998), 本研究也评估了该方法(校正方案B)的有效性。研究结果显示, 对于DHP, 4种不同天顶角范围内, 其测定的 L_e 经过校正方案B校正后与凋落物法测定值均不存在显著差异, 表明校正方案B是可靠、有效的。相对而言, 校正方案B对LAI-2000法的校正效果较差, 只适用于校正4环和1–5环天顶角范围内的 L_e 。理论上, 校正方案C能够合理、有效地校正木质部和集聚效应对光学仪器法测定LAI的影响, 尤其是木质部, 树干比例(α_{stem})的引入能够避免校正叶片集聚效应的同时对木质部也进行集聚效应的校正。但研究结果显示, 校正方案C对LAI-2000法测定的不同天顶角范围内 L_e 的校正效果优于前2种校正方案, 而对于DHP, 校正方案B和C的校正效果相同, 这可能主要源于DHP测定的SAI值较小, 导致集聚效应对木质部过度校正的影响不显著, 可见SAI的值越大, 校正方案C对光学仪器法测定值的校正效果越好。

总体而言, 除木质部和集聚效应是影响DHP和

LAI-2000法测定LAI精度的主要因素外,天顶角范围的选择对其测定精度也至关重要。针对以上因素,本研究提出了3种校正方案,并对2种光学仪器法测定的 L_e 的校正效果进行了评估。只要合理选择天顶角范围,每种方案均能有效地校正DHP和LAI-2000法测定的 L_e ,但校正方案C在理论和实际效果上均最优。此外,只要有效测定校正方案中的相关参数,这3种校正方案同样适用于其他落叶针叶林;落叶阔叶林内,利用背景值法校正木质部对光学仪器法测定最大LAI时产生的偏差,同样存在高估木质部贡献的问题;然而,本研究中的校正方案在落叶阔叶林中的校正效果需在日后研究中进行验证。

基金项目 中央高校基本科研业务费专项(DL13E-A05)和黑龙江省留学归国基金项目(LC2016006)。

参考文献

- Behera SK, Srivastava P, Pathre UV, Tuli R (2010). An indirect method of estimating leaf area index in *Jatropha curcas* L. using LAI-2000 plant canopy analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 307–311.
- Bréda NJJ (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54, 2403–2417.
- Chen J, Liu J, Cihlar J, Goulden M (1999). Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling*, 124, 99–119.
- Chen JM (1996). Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80, 135–163.
- Chen JM, Black TA (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15, 421–429.
- Chen JM, Cihlar J (1995). Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 34, 6211–6222.
- Chen JM, Govind A, Sonnentag O, Zhang Y, Barr A, Amiro B (2006). Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 257–268.
- Chen JM, Rich PM, Gower ST, Norman JM, Plummer S (1997). Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102, 29429–29443.
- Chen X, Sang WG (2007). Dynamics of leaf area index and canopy openness for three forest communities in the warm temperate zone of China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 431–436. (in Chinese with English abstract) [陈厦, 桑卫国 (2007). 暖温带地区3种森林群落叶面积指数和林冠开阔度的季节动态. 植物生态学报, 31, 431–436.]
- Cutini A, Matteucci G, Mugnozza G (1998). Estimation of leaf area index with the LI-COR LAI 2000 in deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, 105, 55–65.
- Dufrène E, Bréda N (1995). Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods. *Oecologia*, 104, 156–162.
- Editorial Board of Forest in China (1997). *Forest in China*. Vol. 2. China Forestry Publishing House, Beijing. 592–607. (in Chinese) [中国森林编辑委员会 (1997). 中国森林第二卷. 中国林业出版社, 北京. 592–607.]
- Eriksson H, Eklundh L, Hall K, Lindroth A (2005). Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 27–37.
- Fang H, Li W, Wei S, Jiang C (2014). Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NE China: Intercomparison of destructive sampling, LAI-2200, digital hemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198–199, 126–141.
- Galia Selaya N, Oomen RJ, Netten JJ, Werger MJ, Anten NP (2008). Biomass allocation and leaf life span in relation to light interception by tropical forest plants during the first years of secondary succession. *Journal of Ecology*, 96, 1211–1221.
- Gower ST, Norman JM (1991). Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology*, 72, 1896–1900.
- Gower ST, Reich PB, Son Y (1993). Canopy dynamics and aboveground production of five tree species with different leaf longevities. *Tree Physiology*, 12, 327–345.
- Hao J, Xiong W, Wang YH, Yu PT, Liu YH, Xu LH, Wang YH, Zhang XB (2012). The comparison and dynamic calibration between the LAI values of a *Larix principis-rupprechtii* plantation determined by canopy scanner and litter-fall collection. *Forest Research*, 25, 231–235. (in Chinese with English abstract) [郝佳, 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 刘延惠, 徐丽宏, 王轶浩, 张晓蓓 (2012). 华北落叶松人工林叶面积指数实测值与冠层分析仪读数值的比较和动态校正. 林业科学研究, 25, 231–235.]
- Ishihara MI, Hiura T (2011). Modeling leaf area index from litter collection and tree data in a deciduous broadleaf forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1016–1022.
- Jonckheere I, Muys B, Coppin P (2005). Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: A case study in Belgium. *Tree Physiology*, 25, 723–732.
- Kucharik CJ, Norman JM, Gower ST (1998). Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect

- measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 69–88.
- Leblanc SG, Chen JM, Fernandes R, Deering DW, Conley A (2005). Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 187–207.
- Liu ZL, Chen JM, Jin GZ, Qi YJ (2015a). Estimating seasonal variations of leaf area index using litterfall collection and optical methods in four mixed evergreen-deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209, 36–48.
- Liu ZL, Jin GZ (2014). Estimation of seasonal changes in leaf area index based on optical methods in spruce-fir valley forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3420–3428. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2014). 基于光学仪器法测定谷地云冷杉林叶面积指数的季节变化. 应用生态学报, 25, 3420–3428.]
- Liu ZL, Jin GZ (2015). Using litter collection and tree data to model leaf area index in the mixed broadleaved-Korean pine forest in the Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3190–3198. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽 (2015). 利用凋落物法和林木因子模拟小兴安岭阔叶红松林叶面积指数. 生态学报, 35, 3190–3198.]
- Liu ZL, Jin GZ, Chen JM, Qi YJ (2015b). Evaluating optical measurements of leaf area index against litter collection in a mixed broadleaved-Korean pine forest in China. *Trees-Structure and Function*, 29, 59–73.
- Liu ZL, Jin GZ, Zhou M (2014). Measuring seasonal dynamics of leaf area index in a mixed conifer-broadleaved forest with direct and indirect methods. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 843–856. (in Chinese with English abstract) [刘志理, 金光泽, 周明 (2014). 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, 38, 843–856.]
- Liu ZL, Wang XC, Chen JM, Wang CK, Jin GZ (2015c). On improving the accuracy of digital hemispherical photography measurements of seasonal leaf area index variation in deciduous broadleaf forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 721–731.
- Luo TX, Pan YD, Ouyang H, Shi PL, Luo J, Yu ZL, Lu Q (2004). Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau. *Global Ecology and Biogeography*, 13, 345–358.
- Ma ZQ, Liu QJ, Zeng HQ, Li XR, Chen YR, Lin YM, Zhang SH, Yang FT, Wang HQ (2008). Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 1971–1980. (in Chinese with English abstract) [马泽清, 刘琪璟, 曾慧卿, 李轩然, 陈永瑞, 林耀明, 张时煌, 杨风亭, 汪宏清 (2008). 南方人工林叶面积指数的摄影测量. 生态学报, 28, 1971–1980.]
- Macfarlane C, Hoffman M, Eamus D, Kerp N, Higginson S, McMurtrie R, Adams M (2007). Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 176–188.
- Maseyk KS, Lin T, Rotenberg E, Grünzweig JM, Schwartz A, Yakir D (2008). Physiology-phenology interactions in a productive semi-arid pine forest. *New Phytologist*, 178, 603–616.
- Mason EG, Diepstraten M, Pinjuv GL, Lasserre J-P (2012). Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166–167, 113–119.
- Nasahara KN, Muraoka H, Nagai S, Mikami H (2008). Vertical integration of leaf area index in a Japanese deciduous broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1136–1146.
- Ren H, Peng SL (1997). Comparison of methods of estimation leaf area index in Dinghushan forests. *Acta Ecologica Sinica*, 17, 220–223. (in Chinese with English abstract) [任海, 彭少麟 (1997). 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, 17, 220–223.]
- Richardson AD, Dail DB, Hollinger DY (2011). Leaf area index uncertainty estimates for model-data fusion applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1287–1292.
- Saigusa N, Yamamoto S, Murayama S, Kondo H, Nishimura N (2002). Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112, 203–215.
- Su HX, Bai F, Li GQ (2012). Seasonal dynamics in leaf area index in three typical temperate montane forests of China: A comparison of multi-observation methods. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 231–242. (in Chinese with English abstract) [苏宏新, 白帆, 李广起 (2012). 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, 36, 231–242.]
- Thimonier A, Sedivy I, Schleppi P (2010). Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: A comparison of methods. *European Journal of Forest Research*, 129, 543–562.
- Walter J-MN, Jonckheere I (2010). Image analysis of hemispherical photographs: Algorithms and calculations. In: Fournier RA, Hall RJ eds. *Hemispherical Photography for Forestry: Theory, Methods, Applications*. Kluwer, Alphen aan den Rijn, Netherlands.
- Wang BQ, Liu ZL, Qi YJ, Jin GZ (2014). Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1956–1964. (in Chinese with English abstract) [王宝琦, 刘志理, 戚玉娇, 金光泽 (2014). 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, 34, 1956–1964.]

Wang C (2006). Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 222, 9–16.

Zeng XP, Zhao P, Rao XQ, Cai XA (2008). Measurement of leaf area index of three plantations and their seasonal changes in Heshan hilly land. *Journal of Beijing Forestry University*, 30(5), 33–38. (in Chinese with English abstract) [曾小平, 赵平, 饶兴权, 蔡锡安 (2008). 鹤山丘陵3种人工林叶面积指数的测定及其季节变化. 北京林业大学学报, 30(5), 33–38.]

Zhang G, Ganguly S, Nemani RR, White MA, Milesi C, Hashimoto H, Wang W, Saatchi S, Yu Y, Myneni RB (2014). Estimation of forest aboveground biomass in California using canopy height and leaf area index estimated from satellite data. *Remote Sensing of*

Environment, 151, 44–56.

Zhang Y, Chen JM, Miller JR (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 166–181.

Zou J, Yan G, Zhu L, Zhang W (2009). Woody-to-total area ratio determination with a multispectral canopy imager. *Tree Physiology*, 29, 1069–1080.

Zou J, Yan GJ (2010). Optical methods for *in situ* measuring leaf area index of forest canopy: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2971–2979. (in Chinese with English abstract) [邹杰, 阎广建 (2010). 森林冠层地面叶面积指数光学测量方法研究进展. 应用生态学报, 21, 2971–2979.]

责任编辑: 阎恩荣 责任编辑: 李 敏

植物生态学报官网

微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布

微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览