

姚克敏, 胡凝, 吕川根, 等. 鱼眼影像技术反演植被冠层结构参数的研究进展 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 139-144.

鱼眼影像技术反演植被冠层结构参数的研究进展

姚克敏¹, 胡凝¹, 吕川根², 黄凤新¹

(1. 南京信息工程大学 应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2 江苏省农业科学研究院 粮食作物研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 快速、可靠、精确的评估植被冠层结构参数在大气—植被相互作用的研究中起着举足轻重的作用。从冠层结构参数的反演原理、冠层间隙度的提取、冠层结构的反演模型和丛生指数 3 个方面论述了冠层结构参数即叶面积指数 (LAI leaf area index) 和叶倾角分布 (LAD, leaf angle distribution) 的反演方法, 并从鱼眼像片的采集、分析和模型的假设等方面分析影响冠层结构参数反演精度的原因, 指出未来鱼眼影像技术虽然是 LAI 和 LAD 间接测量的理想手段, 但是受观测环境、相机光学特性和冠层本身的影响, 反演结果需要通过验证来消除不确定因素。

关键词: 植被; 鱼眼影像; 冠层结构; 冠层间隙度; 丛生指数

中图分类号: S163.5 S163.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)01-0139-06

Advances in Canopy Structure Parameters Retrieval Using Hemispherical Photography

YAO Ke-min¹, HU Ning¹, LÜ Chuan-gen², HUANG Feng-xin¹

(1. School of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044 China

2. Institute of Food Crop, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014 China)

Abstract It is important for the study of the atmosphere-vegetation interaction to extract architectural parameters rapidly and accurately. In this paper, the methods for leaf area index (LAI) and leaf angle distribution (LAD) retrieval are addressed from the following three aspects: the theory and model of canopy structure parameters extraction, the retrieval of gap fraction, and clumping index. And the main factors affecting the retrieval accuracy of canopy parameters in the collection and analysis of fisheye photographs and models hypothesis etc are also analyzed. It is worth pointing out that the hemispherical photography is an ideal indirect LAI and LAD estimation device, while errors from digital hemispherical canopy photography could not be avoided, therefore, parameter validation should be performed to delete the uncertainty in retrieval results.

Key words canopy; hemispherical photography; canopy structure; gap fraction; clumping index

0 引言

冠层截获的辐射量与植物的生长发育有着密切的关系。冠层内的辐射传输和分布受植物自身生长变化和环境因素的共同影响, 所以冠层结构分析是进行植物冠层内辐射分布规律研究的基础。但是, 受植被冠层结构时空变异性的影响和数据采集手段的限制, 野外观测费时、费力。因此, 早期的辐射传输研究^[1]大多基于一定的假设 (以叶面积空间随机

散布和叶角球面分布居多), 这必然会给多样化的植被状况带来较大的研究误差。

鱼眼影像技术是一种快速、可靠、精确评估冠层结构参数的新方法, 它用带有鱼镜头的相机或其他光学传感器在冠层内由下向上摄取冠层影像来研究植被的冠层结构。其最大的优点是能够产生非常大的视角 (接近或等于 180°), 不仅能够清晰地采集冠层顶部的影像, 而且可以拍摄到周围冠层侧方一定范围内的形态结构特征, 通过处理影像数据文件

收稿日期: 2006-12-04 改回日期: 2007-04-12
基金项目: 国家高新技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2003AA212040)
作者简介: 姚克敏 (1939—), 男, 浙江杭州人, 教授, 研究方向为农业气象, yaokm@jiaas.ac.cn

可获取与冠层结构有关的参数,例如叶面积指数、冠层间隙度及间隙分布状况^[25];通过分析辐射数据的相关信息,能够测算出冠层截获的光合有效辐射以及冠层下方的辐射水平^[6-7]。自 Evans等^[8]将其用于冠层辐射状况研究以来,已逐渐在众多领域中崭露了明显的应用价值和开发前景。与传统测量法相比,该方法传感器获取的是二维空间的植被冠层结构信息,并且具有较强的数据处理功能,可以避免传统收割法所造成的大规模破坏森林的缺点,不受时间限制,获取的数据量大,仪器容易操作,方便快捷;还可以测定一年中森林冠层结构的季节变化,已经开始在生态学、果树和森林培育学中得到一定应用。

本文对近几年国内外发表的论文进行分析,从冠层结构两个重要的参数——叶倾角分布(LAD)和叶面积指数(LAI)的反演来论述鱼眼影像技术在地面植被遥感中的研究进展和方向。

1 鱼眼影像技术反演冠层结构参数的研究进展

1.1 冠层结构参数的反演原理

鱼眼影像技术研究的基础是冠层内的辐射环境与冠层结构之间的定量化关系,通常借助于 Beer-Lambert定律的反程序来获取植被的冠层结构,

$$P(\theta, \alpha) = \exp[-G(\theta, \alpha)L/\cos\theta]。$$
 (1)
其中: θ 是视角的天顶角; α 是方位角,但对于叶片方位角随机分布的植被来说,方位角的变化对计算结果没有影响,如 Norman等^[9]指出的很少能找到叶片方位角不对称的植被; $P(\theta, \alpha)$ 是冠层间隙度,直接从鱼眼像片中提取; $G(\theta, \alpha)$ 是 θ 方向单位叶片的投影面积,它是与叶倾角分布有关的函数^[10-11]; L 是植被面积指数,包括叶等绿色器官和枝、干等非绿色器官的面积。

1.2 冠层间隙度的提取

冠层间隙度是关于天顶角的函数,由下式计算得到^[10-11]

$$P(\theta, \alpha) = P_s/(P_s + P_{ns})。$$
 (2)

其中 P_s 、 P_{ns} 分别是在天顶角为 θ 方位角为 α 的区域内天空像元和叶片像元的数量。

获取冠层间隙度,首先要区分影像中的叶片像元和天空像元。研究^[3-12]表明,叶片在蓝色光波段具有较高的吸收率,该波段叶片的灰度值大于天空,更容易从背景中分离开来,这也是 LAI-2000选用小于 490 nm 的可见光波段的原因。但是,有研究发现现在叶片边缘存在众多的模糊点,认为这是由于叶片对太阳辐射的散射作用使得部分叶片像元混入天空像元中^[13],由此建议观测最理想的天空条件是云层均匀分布的阴天,如早晨或傍晚时分,此时辐射的散射量较高。Frazer等^[14]和 Jonckheere等^[15]通过比较蓝色光谱和全光谱图像后认为,这也可能与相机光学特性有关,所导致的色差使得蓝色光谱图像中大量细小叶片消失了。为了消除这种影响,他们建议使用全光谱、高分辨率的图像。

混合像元的分解是影响 LAI精度的主要原因之一^[16]。由于相机感光元件的光学特性,混合像元的分解在不同的环境中具有不可重复性,使得混合像元的分解一直是鱼眼影像技术研究的重点和难点。阈值法是一种简单而有效的方法^[17]。叶片像元的灰度高于天空像元,而混合像元介于两者之间。如果图像中叶片与天空之间的灰度值有明显差异,则利用一阶阈值法,即可把影像分解为叶片和天空;否则用二阶阈值法线性内插分解混合像元^[14-18-19],

$$P = \frac{D - D_{ns}}{D_{ms} - D_{ns}}。$$
 (3)

其中: D 是像元的实际灰度, D_{ns} 、 D_{ms} 分别是天空像元与混合像元、叶片像元与混合像元的阈值。

起初, D_{ns} 和 D_{ms} 的确定采用手动法,但手动法人为因素大、缺乏客观性^[1-2, 14-20],也不利于图像的自动化处理。为此一些自动选取最优阈值的方法应运而生^[15-16], Sezgin等^[21]将之归纳为 6类(表 1)。

表 1 阈值方法概述

Table 1 Summary of automatic threshold algorithm

类型	阈值确定依据
直方图法 (Histogram shape-based)	利用直方图的峰、谷, 及其弯曲程度, 这些属性来进行分类
析聚类法 (Clustering-based)	利用聚类分析将灰度值分为物体和背景二类
熵值法 (Entropy-based)	利用物体和背景区域的熵值或原影像和其二阶影像间的交叉熵值来估算
目标属性法 (Object attribute-based)	寻找灰度影像和二阶影像相似度的估算
空间法 (Spatial)	利用物体像素和背景像素的空间信息, 使用概率密度函数来考虑像素间的关系
局部法 (Local methods)	依据局部影像的特征进行估算

Jonckheere等^[15]通过比较这 6 种阈值法的冠层间隙度和 LAI 反演结果发现, 聚类法对各种冠层具有普适性, 而对于那些曝光过度或不足的像片局部法更为合适。

1.3 冠层结构的反演

由冠层间隙度反演冠层结构以冠层辐射传输模型为基础, 大多数研究者在实际使用中以泊松分布模型^[10-22]为主, 它假设叶片在空间随机散布, 叶角呈球面分布。基于冠层结构在空间上的异质性, 目前也有一些研究者使用正(负)二项式模型或马尔可夫(Markov)模型来描述冠层的非随机分布^[23-26], 但由于这些模型需要更多的输入参数, 比如树冠、树干等信息, 实际应用困难。

因此多数研究都是利用泊松模型中冠层结构与冠层间隙度的关系, 反演 LAI 和 LAD。主要有单角度反演和多角度反演。

(1) 单角度反演法: 反演的基础是 Warren-Wilson^[27]的研究结果, 当天顶角为 57.5° , G 值接近 0.5 而且与叶角无关; 在天顶角为 $53^\circ \sim 68^\circ$ 时, G 与平均叶角呈线性关系。利用天顶角为 57.5° 时的冠层间隙度由(1)式即可反演 LAI。Bonhomme等^[28]认为该方法适用于作物生长初期 LAI 较小时。

(2) 多角度反演法: 应用 Miller等^[29]公式进行全角度反演可以精确获取 LAI。但是, 用这种方法难以提取天顶角接近 90° 时的冠层间隙度。相比之下, Wells等^[11]提出的多角度反演更为实用, 它去除了冠层间隙度为 0 时的情况。

需要注意的是, 以上反演过程的基础大多是泊松分布模型。对于非球形叶角分布的冠层, 迭代反演法更为合适, Perry等^[30]令初始平均叶角为 55° 以迭代优化技术逐步调整模型参数^[11-31]; Norman等^[10]及 Chen等^[3]提出了线性最小平方反演技术, 通过测量不同天顶角的冠层间隙度矩阵可同时反演 LAI 和 LAD。但是, 对于大量的图像处理而言, 这种迭代非常耗时。Knyazikhin等^[32]和 Weiss等^[33]针对迭代法的优势, 提出查表法(Look-Up-Table, LUT), 预先在 LAI(0~9)和平均叶角($0^\circ \sim 90^\circ$)范围内用反演模型得到 LUT 表, 使用时将观测到的冠层间隙度和天顶角与之匹配, 可以迅速获得 LAI 值。

1.4 丛生指数(Ω)

Nilson^[22]指出, 丛生效应是由冠层间隙度反演 LAI 值最主要的误差之一。不考虑丛生效应的针叶林, 其观测值较实际 LAI 低 30%~70%^[3, 12, 34], 而

叶片均匀分布的冠层, 其观测值高于实际 LAI^[35-36]。因此, 引入一个新的变量——丛生指数^[37-39], 它与天顶角方向有关^[22]。基于泊松模型提取的 LAI 是有效 LAI(L_e), 与实际 LAI(L)的关系可以由下式表示:

$$L_e = \Omega(\theta, \alpha)L \quad (4)$$

获取 Ω 的解决方法之一就是通过取样, 建立冠层间隙度与丛生指数的经验关系^[39-41], 但是这种观测费时费力, 只适合植株个体尺度上的丛生。另一解决途径就是利用冠层间隙度反演丛生指数, 除了上面所提到的正(负)二项式或 Markov 光学模型外, Lang等^[42]的对数平均法(log-average method)和 Chen等^[43]的冠层间隙尺寸累计函数法(accumulated gap size function)可以获得类似的结果。前者适合个体尺度上的丛生; 而后者对小于个体尺度的丛生更为合适。此外, van Gardingen等^[44]针对由丛生效应所导致的冠层间隙度分布不均的现象提出, 在原先以每隔 $5^\circ \sim 10^\circ$ 天顶角划分若干圆环的基础上将每个同心圆再划分为若干片断, 使 LAI 的反演误差从 50% 减小到 15%。Li等^[45]也针对 Chen等^[3]提出的提取 LAD 误差产生的原因可能在于假设对不同的观察方向叶丛生指数为常量, 将树冠间间隙的概念引入 Norman 和 Campbell 的方法, 并将叶丛生指数明确地表示作观察方向天顶角的函数, 提取了令人满意的 LAI 和 LAD 估计值。

1.5 影响植被参数提取精度的因素

影响冠层结构反演精度的因素除了上面提到的冠层间隙度提取方法、冠层结构反演模型和丛生效应所导致的误差外, 鱼眼像片的采集也是误差的一大来源。Inoue等^[46]通过分析不同类型相机、不同精度像片的冠层间隙度反演结果发现, 影响反演结果诸多因子中一个主要因子就是像元的异质性, 像片的精度决定了误差的大小, 像片分辨率越高, 反演结果越精确。

其次, 曝光量的控制对结果也存在不同的影响。Macfarlane等^[36]和 Zhang等^[47]对比不同曝光量对观测结果的影响时发现: 当 $L_e = 3.2 \sim 4.8$ 时, 自动曝光使冠层间隙度增加了 18%~72%, L_e 减少了 16%~71%; 当 $L_e < 1.26$ 时, 冠层间隙度减少了 4%~28%, L_e 增加了 11%~29%。研究还发现, 相机的快门速度每变化一档, L 改变 3%~28%。认为正确的曝光量应是冠层上方的自动曝光量再增加 2 档。

除此之外, 地形也是影响精度的因素之一。

Walter等^[48]在公式中引入坡度 β' 来修正天顶角 θ 认为在坡度大于 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 时, 地形将严重影响冠层结构参数的反演结果。

Jonckheere等^[49]根据前人的研究成果将可能产生误差的环节归纳如下(表 2)。

表 2 反演精度的误差来源

Table 2 Errors from digital hemispherical canopy photography

类别	误差来源
图像采集	相机位置 /测点代表性
	相机水平 /垂直位置
	曝光量
	天空辐射状况的均一性
	叶片表面辐射状况的均一性
图像分析	光学扭曲
	冠层间隙度的均一性
	假设的直接辐射分布
	假设的散射辐射分布
	假设的光截取面积
	图像处理与放大
模型的假设	缺失的像元
	G 函数
	叶倾角分布
	丛生效应

2 讨论

目前, 国外已经研制成功了一系列以鱼眼影像技术为基础的数字植物冠层图像分析仪, 如 CF11Q HEMISPHERIC、WINSCANOPY 等, 国内这几年也发表了这些仪器的相关应用文献^[50-52]。它们采用了 20 世纪 90 年代的最新技术, 利用一个鱼眼成像信息采集器, 获取二维空间的植被冠层图像。由于鱼眼镜头具有 180° 的广角视野, 可以同时获取不同天顶角的冠层结构信息, 比传统的线性传感器拥有更大的数据量^[11]。近几年, 随着科学技术的发展和数码相机的普及, 未来鱼眼影像技术将和 LAI-200Q TRAC 一样, 是间接测量冠层结构的一个重要手段。

国内外科学家对植被冠层结构的反演做了大量的验证研究^[3-4, 13, 20]发现, 在森林生态系统中鱼眼影像技术在提取冠层结构方面效果良好, 尤其是针叶林, 大大降低了劳动量。但是在高 LAI 的植被中, 由于冠层下方辐射环境很暗和多次散射作用, 估计丛生指数十分困难。这同样出现在农田生态系统

中, 尤其是作物生长后期 LAI 较高时, 在冠层下方提取的冠层间隙都基本为 0 无法反演冠层结构参数。

根据这一现状, 认为今后可以从以下几个方面来突破。

(1)多通道组合运算。

在混合像元分解过程中, 单一通道的灰度图像数据往往受外部环境(如视角、太阳角、云等)和在非植被因素(如相机 CCD 的感光性能等)的影响。利用多通道光谱数据的组合运算来实现植被状态信息的表达, 可以增强对植被的敏感度, 削弱背景信号。

(2)选择较高辐射分辨率的相机或其他光学传感器。

目前所采用的数码相机以 8 位存储格式为主, 最高为 12 位, 辐射分辨率很有限, 而且其能识别的光谱波段也主要为可见光波段, 无法区分直射光和散射光。但是, Leblond等^[13]研究表明, 叶片的散射作用是影响 LAI 反演精度的主要原因之一。LAI-2000 采用蓝色波段光来减少散射作用的影响, 并要求测量时间安排在散射辐射为主的天气状况下^[53]。因而, 装有选择性透过镜头的鱼眼冠层分析仪可能是提高冠层结构反演精度的途径之一。

(3)对比相机和其他光学传感器提取的冠层间隙度结果, 验证反演结果。

鱼眼影像技术和 LAI-2000 一样都是利用冠层内的辐射传输受植物冠层结构的影响来反演植被参数。前人对各种冠层的研究成果^[54-55]表明, 这两种仪器的观测结果有较好的一致性。但是, 受鱼眼相机 CCD 光学特性的影响, 冠层间隙度的提取结果往往随冠层内辐射状况或者曝光量的变化而波动, 不具有重复性; Chen 等^[56]也注意到由此导致鱼眼像片阈值的不确定性, 将最终决定反演的结果。因此, 今后应尝试使用矩阵传感器的观测值对鱼眼图像的获取和冠层结构的反演进行验证, 以消除反演过程中的不确定因素。

参考文献:

[1] 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 [J]. Agric For Meteorol, 2004, 121 (1/2): 19-35.

[2] Rich P M. Characterizing plant canopies with hemispherical photography [J]. Remote Sens Rev, 1990, 5(1): 13-29.

[3] Chen J M, Black T A, Adams R S. Evaluation of hemispherical

- photography for determining plant area index and geometry of a forest stand[J]. *Agric For Meteorol* 1991, 56(1/2): 129-143
- [4] Fournier R A, Landry R, August N M, et al Modeling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture[J]. *Agric For Meteorol* 1996, 82(1/2/3/4): 47-72
- [5] Frazer G W, Trofymow J A, Lertzman K P. Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests[J]. *Can J Forest Res* 2000, 30(2): 239-256
- [6] Wagner S. Relative radiance measurements and zenith angle dependent segmentation in hemispherical photography[J]. *Agric For Meteorol* 2001, 107(2): 103-115.
- [7] Hardy J P, Melbör R, Koenig G, et al Solar radiation transmission through conifer canopies[J]. *Agric For Meteorol* 2004, 126(3/4): 257-270
- [8] Evans G C, Combe D E. Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate[J]. *J Ecol* 1959, 47(1): 103-113
- [9] Norman J M. Modeling the complete crop canopy[C] // Barfield B J, Gerber J F. Modification of the Aerial Environment of Plants Michigan: American Society of Agricultural Engineer, 1979, 249-277
- [10] Norman J M, Campbell G S. Canopy structure[C] // Pearcy R W, Ehleringer J R, Mooney H A, et al Plant Physiological Ecology Field Methods and Instrumentation. London: Chapman and Hall 1989, 301-325
- [11] Welles J M, Norman J M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture[J]. *Agron J* 1991, 83(5): 818-825
- [12] Nackaerts K, Sterckx S, Coppin P. Fractal dimension as correction factor for stand-level indirect leaf area index measurements[C] // Proceedings of EO/S/SPIE Symposium on Remote Sensing Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology III Italy: Firenze, 1999, 80-89
- [13] Leblanc S G, Chen J M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements[J]. *Agric For Meteorol* 2001, 110(2): 125-139
- [14] 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[J]. *Agric For Meteorol* 2001, 109(4): 249-263.
- [15] Jonckheere I, Nackaerts K, Muys B, et al Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography[J]. *Agric For Meteorol* 2005, 132(1/2): 96-114
- [16] Nobis M, Hunziker U. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection[J]. *Agric For Meteorol* 2005, 128(3/4): 243-250.
- [17] Prewitt J M S, Mendelsohn M L. The analysis of cell images[J]. *Annals of the New York Academy of Science* 1966, 128(4): 1035-1053
- [18] Olson L, Carlsson K, Grip H, et al Evaluation of forest-canopy photographs with diode-array scanner OSRIS[J]. *Can J Forest Res* 1982, 12(4): 822-828.
- [19] Wagner S. Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis[J]. *Agric For Meteorol* 1998, 90(1/2): 103-117.
- [20] Chan S S, McCreight R W, Walstad J D, et al Evaluating forest vegetative cover with computerized analysis of fisheye photographs[J]. *Forest Sci* 1986, 32(4): 1085-1091.
- [21] Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. *J Electron Imaging* 2004, 13(1): 146-165.
- [22] Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands[J]. *Agr Meteorol* 1971, 8(1): 25-38
- [23] Neumann H H, Hartog G, Shaw R H. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall[J]. *Agric For Meteorol* 1989, 45(3/4): 325-345
- [24] Chason J W, Bakker D D, Huston M A. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area[J]. *Agric For Meteorol* 1991, 57(1/2/3): 107-128
- [25] Nilson T. Inversion of gap frequency data in forest stands[J]. *Agric For Meteorol* 1999, 98-99(Special Issue): 437-448.
- [26] Brown P L, Doley D, Keenan J. Estimating tree crown dimensions using digital analysis of vertical photographs[J]. *Agric For Meteorol* 2000, 100(2/3): 199-212
- [27] Warren-Wilson J. Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats[J]. *Aust J Bot* 1963, 11(1): 95-105
- [28] Bonhomme R, Varlet G C, Chartier P. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops[J]. *Photosynthesis* 1974, 8(1): 299-301.
- [29] Miller E E, Norman J M. A sunfleck theory for plant canopies I: Length of sunlit segments along a transect[J]. *Agron J* 1971, 63(2): 735-738.
- [30] Peny S G, Fraser A B, Thomson D W, et al Indirect sensing of plant canopy structure with simple radiation measurements[J]. *Agric For Meteorol* 1988, 42(2/3): 255-278.
- [31] Lang A R G. Leaf area and average leaf angle from direct transmission of sunlight[J]. *Aust J Bot* 1986, 34(3): 349-355.
- [32] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, et al Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data[J]. *J Geophys Res* 1998, 103(D24): 32257-32275.
- [33] Weiss M, Baret F, Myneni R B, et al Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data[J]. *Agronomie* 2000, 20(1): 3-22
- [34] Senberg P. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers[J]. *Agric For Meteorol* 1996, 79(1/2): 1-8
- [35] Fassnacht K S, Gower S T, Norman J M, et al A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area in-

- dex in forests[J]. *Agric For Meteorol* 1994, 71(1/2): 183-207
- [36] Macfarlane C, Coote M, White D A, et al. Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantations of *Eucalyptus globulus* Labill[J]. *Agric For Meteorol* 2000, 100(2/3): 155-168
- [37] Gower ST, Norman JM. Rapid estimation of leaf-area index in conifer and broad-leaf plantations[J]. *Ecology* 1991, 72(5): 1896-1900
- [38] Smith N J, Chen JM, Black T A. Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using the LICOR LAI-2000[J]. *Can J Forest Res* 1993, 23(9): 1940-1943
- [39] Stenberg P, Linder S, Smolander H, et al. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf-area index of some Scots pine stands[J]. *Tree Physiol* 1994, 14(7/8/9): 981-995
- [40] Chen JM, Black T A. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions[J]. *Agric For Meteorol* 1992, 60(3/4): 249-266
- [41] Fournier R A, Rich P M, Landry R. Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest[J]. *J Geophys Res* 1997, 102(D24): 29445-29454
- [42] Lang A R G, Xiang Y. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies[J]. *Agric For Meteorol* 1986, 37(3): 229-243
- [43] Chen JM, Chikr J. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurement of leaf area index[J]. *Appl Opt* 1995, 34(27): 6211-6222
- [44] van Gardingen P R, Jackson G E, Hernandez-Daumas S, et al. Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography[J]. *Agric For Meteorol* 1999, 94(3/4): 243-257
- [45] Li X W, Wang J D, Xiang Y Q, et al. Measuring leaf angle distribution and leaf area index of conifer canopies simultaneously on wide-angle image[J]. *J Remote Sens* 1997, 1(Suppl): 54-61
- [46] Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N, et al. Effect of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography[J]. *Agric For Meteorol* 2004, 126(1/2): 89-97
- [47] Zhang Y, Chen JM, Miller J R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation[J]. *Agric For Meteorol* 2005, 133(1/2/3/4): 166-181
- [48] Walter J N, Torquebiau E F. The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors[J]. *Ecology* 2000, 323(9): 801-813
- [49] 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[J]. *Agric For Meteorol* 2004, 121(1/2): 19-35
- [50] 丁圣彦, 卢训令, 李昊民. 天童国家森林公园常绿阔叶林不同演替阶段群落光环境特征比较[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2862-2867
- [51] 罗俊, 张华, 邓祖湖, 等. 甘蔗不同叶位叶片形态与冠层特征的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(1): 28-31
- [52] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林. 叶面积指数的快速测定方法—植被定量遥感的地面标定技术[J]. *国土资源遥感*, 1998, 35(1): 54-60
- [53] Weiss M, Baret F, Smith G, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part II: Estimation of LAI errors and sample[J]. *Agric For Meteorol* 2004, 121(1/2): 37-53
- [54] Martens S N, Ustin S L, Rousseau R A. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis[J]. *Forest Ecology and Management* 1993, 61(1/2): 91-108
- [55] Planchais I, Pontailler J Y. Validity of leaf areas and angles estimated in a beech forest from analysis of gap frequencies using hemispherical photographs and a plant canopy analyzer[J]. *Ann For Sci* 1999, 56(1): 1-10
- [56] Chen JM, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements[J]. *J Geophys Res* 1997, 102(D24): 29429-29443