

# 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

陈 厦<sup>1,2</sup> 桑卫国<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室,北京 100093)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘 要** 以辽东栎(*Quercus liaotungensis*)为主的落叶阔叶林、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林和油松(*Pinus tabulaeformis*)林是暖温带林区具有代表性的森林群落类型。该研究应用国内外流行的半球图方法,通过对这 3 种森林群落叶面积指数和林冠开阔度的测定和综合比较,分析了叶面积指数和林冠开阔度的季节动态,揭示了暖温带地区不同类型森林群落叶面积指数和林冠开阔度的特征。研究结果表明,落叶阔叶林(优势种为辽东栎、棘皮桦(*Betula dahurica*)和五角枫(*Acer mono*))和华北落叶松林两种落叶森林群落的叶面积指数值均随生长季的到来而呈现增长的趋势,最大值出现在 8 月;林冠开阔度值随着生长季的到来而下降,最大值出现在 11 月。落叶阔叶林的叶面积指数和林冠开阔度的季节动态较之华北落叶松林明显。油松是常绿树种,其群落叶面积指数和林冠开阔度的变化程度均不明显,但林冠开阔度的变化趋势也是与叶面积指数的变化趋势相反。通过计算得出叶面积指数和林冠开阔度相关显著,并且呈现指数回归的关系。此研究结果为以遥感途径获取暖温带地区叶面积指数提供了地面校正依据,为研究该地区植被林冠的异质性及其造成的影响,以及进一步对该地区林分、景观和区域尺度上碳、水分和通量等方面的模拟提供了基础数据。

**关键词** 叶面积指数 林冠开阔度 动态

## DYNAMICS OF LEAF AREA INDEX AND CANOPY OPENNESS FOR THREE FOREST COMMUNITIES IN THE WARM TEMPERATE ZONE OF CHINA

CHEN Sha<sup>1,2</sup> and SANG Wei-Guo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China, and

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract Aims** Leaf area index (LAI) and canopy openness are two important biophysical parameters of canopy structure related to water and carbon fluxes and light interception. They are not only key variables in ecological and climate models, but also important indicators of forest ecosystem productivity. Accurate estimates of LAI and canopy openness are required in studies of ecophysiology, atmosphere-ecosystem interactions, and global change. Many researches have been done in Dongling Mountain in the warm temperate zone; however, fewer studies have focused on LAI and canopy openness. The objective of this study is to measure and analyze the dynamics of LAI and canopy openness of three typical forest communities in this area. Results will be useful in testing and validating LAI estimations based on remote sensing, providing reference for study of canopy heterogeneity and its effects and modeling carbon, water and energy fluxes from stand to landscape levels.

**Methods** We used hemispherical photographs taken from the ground through a fisheye lens for indirectly assessing LAI and canopy openness. Photos were taken in May, August, September and November 2005 in deciduous broad-leaved forest (DBF), *Larix principis-rupprechtii* forest (LF) and *Pinus tabulaeformis* forest (PF).

**Important findings** The LAI of DBF and LF increased gradually with plant growth and development to August. The lowest value of canopy openness appeared in November. DBF maintained a higher LAI in August and was more open in November compared to LF. For PF, we observed few changes of LAI and canopy openness, which we attribute to leaf retention of this evergreen species. In all forests, canopy openness varied inversely

收稿日期:2006-06-02 接受日期:2006-10-19

基金项目:国家自然科学基金项目(30590382/C011108),北京山区森林健康经营关键技术研究与示范(D0706001000091)和中国科学院台站网络基金项目(CERN-BFE-1)

\* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: swg@ibcas.ac.cn

with *LAI*. The correlation was exponential and significant; therefore, canopy openness is a good indicator of *LAI* in these forests.

**Key words** leaf area index, canopy openness, dynamics

叶面积指数(Leaf area index, *LAI*)和林冠开阔度(Canopy openness)均是林分冠层结构的重要组成部分。冠层结构不仅影响太阳能的截获量,而且可通过影响林内水、热、气等微环境来调节植物与环境的相互作用,影响整个林分的光合效率(方升佐等,1998)。

叶面积指数由英国农业生态学家 Watson 于 20 世纪 40 年代中期提出,该指数直接与许多生物和生理过程相关(截留、呼吸、蒸腾等),因此,叶面积的大小和分布,直接影响着林分对光能的利用。经过半个世纪的系统研究,*LAI* 已成为表征植被冠层结构和植物群落生产力的重要指标(群落的生产力决定于群落的 *LAI* 和各层植物的光合速率(张祝平,1990))。*LAI* 是单位地面面积上叶子总面积的一半,即 *LAI* 是无量纲度量(王希群等,2005)。研究表明:*LAI* 是在林冠水平上(McNaughton,1983)以及景观尺度上(Running & Coughlan,1988)模拟水分蒸发蒸腾损失总量的一个重要指标(朱春全等,2001)。森林 *LAI* 的研究是生态系统生长过程模拟的必要参数,对估算林分及大尺度上碳、水分和能量的交换具有重要作用。

林冠开阔度指当从林地一点向上仰视,未被树木枝干所遮挡的天空球面的比例。林冠开阔度 = 1 - 林冠郁闭度(Canopy closure,指林地被树冠垂直投影所覆盖的比例,与生态学中的植被覆盖度相似(朱教君,2003)),林冠开阔度经常用于生态学文献中(朱教君,2003;Vales & Bunnell,1998)。林冠开阔度仅能从半球图中获得,并且不受周围地形的影响(Frazer *et al.*,1999)。

科学家们对暖温带地区森林生态系统进行了多项研究,但目前对森林群落 *LAI* 和林冠开阔度的研究尚且不是很多。而 *LAI* 和林冠开阔度的动态变化具有重要的研究意义:1) *LAI* 的动态变化可以反映遥感数据与植物生长状态关系。随着测定技术的发展和遥感技术的应用,通过光学遥感技术获取大区域范围植被 *LAI* 已经成为当前有效途径。但是,遥感得到的 *LAI* 数据需要进一步的地面验证(方秀琴和张万昌,2003;张佳华,2001;李小文和王锦地,1995;胡良军和邵明安,2001;赵平等,2002;惠凤鸣等,2003;Gholz,1982;Pierce & Running,1988),这就要求我们能够直接或者间接地在地面获取较为准确

的 *LAI* 2) 林冠 *LAI* 分布及其动态变化的研究,是研究林分生产力的关键(朱春全等,2001;Lassoies & Hinckely,1991)。快速准确地估算叶面积,有助于林分、景观以及地区尺度上对碳、能量、水分通量进行研究 3) 利用暖温带地区 *LAI* 的动态变化规律,结合与生产力、水分的关系,可以为日后该地区植被恢复、造林树种选择、森林经营管理提供重要的理论和实践价值 4) 林冠开阔度的动态研究是林冠结构动态和林冠生长动态的一个表现,为研究地区植被林冠的异质性以及这些异质性造成的影响(如林分土壤水分、土壤有机质等的空间变化)提供重要依据。本研究试图通过光学仪器半球图方法,对暖温带地区具有代表性的 3 种森林群落的 *LAI* 和林冠开阔度进行测定和综合比较,分析 *LAI* 和林冠开阔度的季节动态,找到两者之间的相关性,揭示暖温带地区不同类型森林群落 *LAI* 和林冠开阔度的特征,为进一步研究提供依据。

## 1 研究地区概况

研究地点在中国科学院北京森林生态系统定位站,位于 39°48' ~ 40°00' N, 115°24' ~ 115°36' E 的北京市东灵山地区,为暖温带大陆性季风气候,历年平均降水量为 500 ~ 650 mm。平均气温 5 ~ 11 °C,最热月 7 月,平均气温为 18 ~ 25 °C,最冷月 1 月,平均气温为 -4 ~ 10 °C。该地区的土壤有褐土、棕壤、亚高山草甸土等几种类型。

该地区的主要植被型为:寒温性针叶林、温性针叶林、落叶阔叶林、落叶阔叶冠丛、草甸(陈灵芝和黄建辉,1997)。反映该地区大气水量和水分条件的地带性植被为暖温带落叶阔叶林,因此东灵山地区森林在我国暖温带类型繁多的森林生态系统中具有显著的代表性。

所研究的 3 个森林群落为:以辽东栎(*Quercus liaotungensis*)为主的落叶阔叶林(Deciduous broad-leaved forest, DBF, 30 m × 70 m)、华北落叶松林(*Larix principis-rupprechtii* forest, LF, 30 m × 40 m)和油松林(*Pinus tabulaeformis* forest, PF, 30 m × 30 m),分别为暖温带落叶阔叶林、落叶针叶林和常绿针叶林,是具有代表性的群落类型(陈灵芝和黄建辉,1997)。

表 1 3 种森林群落基本情况

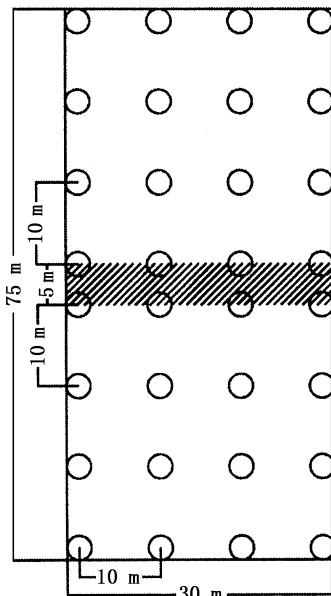
Table 1 The general information of the three forest communities

项目 Item	落叶阔叶 林 DBF	华北落叶 松林 LF	油松林 PF
海拔 Elevation (m)	1 200	1 200	1 150
坡度 Slope	28°	26°	30°
坡向 Aspect	35° NW	40° NW	60° NE
密度 Density (trees·hm <sup>-2</sup> )	1 262	2 700	2 000
胸径 DBH (m)	12.2	14.8	17.5
树高 Height (m)	6.8	17	18

DBH : Diameter at breast height DBF : Deciduous broad-leaved forest  
LF : *Larix principis-rupprechtii* forest PF : *Pinus tabulaeformis* forest

## 2 研究方法

图 1 所示为 DBF(30 m × 70 m) 的测量路线, LF 和 PF 的测定路线采取相同的方法。即在样地中每隔 10 m 做一个标记, 最终形成 8 行 4 列标记点。将 NIKON995 数码相机和 NIKON FC-E8 鱼镜头安装在距离地面 1.5 m 左右的三脚架上, 将数码相机的设置为“Fisheye”, 沿着标记点平行线在每个标记点进行半球图的拍摄。为了避免拍摄过程中相机的摆动, 照片在自拍状态下完成。选择具有代表性的时间进行 4 次拍摄, 分别为: 5 月(叶子生长期)、8 月(叶子茂盛期)、9 月(叶子凋落前)和 11 月(叶子凋落后)。拍摄的最佳状态是太阳光能从云层均匀透射的阴天时间, 次佳是晴天的太阳出山以前和落山



///////: 为过渡带 Transition zone

○: 半球图拍摄地点  
Locations for measurement

图 1 半球图的测定方案

Fig. 1 Sampling scheme for hemispherical photograph

以后, 因为这些时间辐射的散射量较低。最差状态是天空中带有不均匀分布的云彩或是晴天, 因为前者会使入射光迅速发生变化, 后者会使鱼镜头低估 LAI 和高估太阳辐射和散射(赵平等, 2002)。因此尽量选择在阴天或是太阳出山之前和落山之后进行拍摄, 也应注意选择在风很小的天气里进行拍摄, 因为风会使叶子发生摆动, 造成图片上叶子的模糊不清。

对所获的数码照片利用软件 GLA(Gap light analyzer) 进行分析, 处理过程中最关键的是天空和树冠成分的区分阈值的确定(Bréda, 2003), 这一步采用能自动确认阈值的软件 SIDELOOK 完成。

## 3 研究结果

### 3.1 3 种森林群落 LAI 的季节动态

图 2 的曲线表明, DBF 和 LF 两种落叶森林群落的 LAI 随着生长季的到来而呈现增高的趋势, 均是单峰型, 到 8 月出现最高值, 分别为(2.90 ± 0.09) 和(2.54 ± 0.08); 从 9 月开始 LAI 大幅度下降。DBF 的 LAI 变动幅度较大, 从 5 ~ 8 月升高 22.4%, 到 11 月降低 82.1%; LF 的 LAI 从 5 ~ 8 月升高幅度相对较小, 仅为 1.6%, 到 11 月降低 62.5%。对于 PF, 每月的 LAI 值变化不大, 均在 2.00 左右。最大值出现在 5 月, 为 2.30; 最小值出现在 11 月, 为 1.91。从 5 ~ 11 月, PF 的 LAI 值呈现微弱的下降趋势, 下降 17.0%。DBF、LF 和 PF 3 种森林群落的 LAI 平均值为 PF > DBF > LF, 平均值分别为 2.14、2.00 和 1.98。

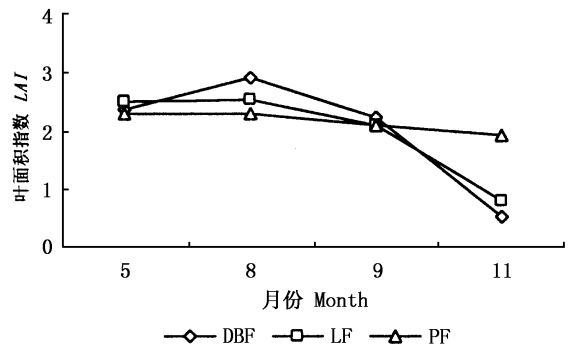


图 2 3 种森林群落的叶面积指数季节动态

Fig. 2 Dynamics of leaf area index (LAI) for the three forest communities

DBF、LF、PF: 见表 1 See Table 1

### 3.2 3 种森林群落林冠开阔度的季节动态

图 3 的曲线表明, 与 LAI 的动态特征相反, DBF 和 LF 两种落叶森林群落的林冠开阔度随着生长季

的到来而呈现降低的趋势,到8月出现最低值,分别为8.58%和10.87%;从9月开始大幅度上升。DBF的林冠开阔度升降幅度都很大,从8月的8.58%上升到11月的45.76%,LF从8月的10.87%上升到11月的37.76%。对于PF,5~11月林冠开阔度分别为12.71%、12.81%、14.92%和16.81%,平均值为14.31%,这个值与DBF和LF的8、9月的林冠开阔度比较相近。DBF、LF和PF 3种森林群落的林冠开阔度平均值为DBF > PF > LF,平均值分别为20.88%、20.19%和14.31%。

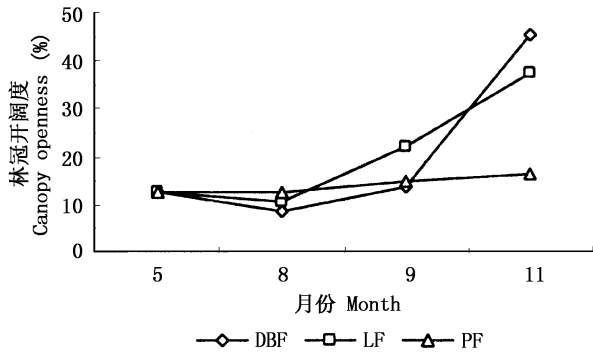


图3 3种森林群落林冠开阔度的季节动态

Fig.3 Dynamics of canopy openness for the three forest communities  
DBF, LF, PF: 见表1 See Table 1

### 3.3 3种森林群落 LAI 与林冠开阔度的相关关系

DBF、LF和PF 3种森林群落的 LAI 和林冠开阔度的指数函数回归曲线显示,林冠开阔度会随着叶面积指数的增长而呈现衰减,相关关系均极显著( $p < 0.01$ ),但是不同的森林群落之间存在着差异,其中以PF的衰减速度为最大( $e = -0.713, 1$ ),DBF的相关关系最为显著( $r = 0.993, 1$ )。

### 3.4 3种森林群落的冠层均匀性分析

如表2,我们选择 LAI 值最大的8月进行3种森林群落林冠均匀性的分析。由3种森林群落 LAI 的变异系数我们可以知道,PF的 LAI 的变异系数最小,即PF的林冠均匀性最大。3种森林群落的林冠均匀性大小分别为:PF > LF > DBF。

表2 3种森林群落8月的叶面积指数(LAI)和变异系数(CV)

Table 2 Leaf area index (LAI) and coefficient of variation (CV) for the three forest communities in August

群落类型 Type of community	LAI	CV (%)
落叶阔叶林 DBF	2.90 <sup>a</sup> ± 0.52	17.93
华北落叶松林 LF	2.54 <sup>b</sup> ± 0.36	14.17
油松林 PF	2.28 <sup>c</sup> ± 0.24	10.53

表中相同列不同字母间表示差异显著 The different letters show different significance ( $p < 0.01$ ) DBF, LF, PF: 见表1 See Table 1

## 4 讨论

### 4.1 暖温带地区 LAI 的研究展望

本研究应用半球图方法,较为准确地获取了暖温带地区的 LAI。在以后的研究中,结合该地区的遥感数据和生物气候数据,可以建立 LAI 和降水以及温度的总体相关关系,揭示大尺度的植被季节和年际变化对气候变化的敏感性特征响应,进一步从地球物理学、生态学、气候学等多个角度阐明出现相关特征差异的原因和物理机制(王希群等,2005;李小文和王锦地,1995)。

在森林研究中,作为森林生长模型(如 FOREST-BGC)中的 LAI 是一个非常重要的中间变量,其模拟的精度直接影响整个模型的模拟效果。而已有的研究成果仍然没有很好地解决实际条件下 LAI 的动态模拟。从本研究结果可以看出, LAI 在落叶林群落中的变化是非常明显的,而且,由于每年的气候状况不同(如风)会引起 LAI 的变化。但是,在以前的研究中通常我们都会输入一个单一的 LAI 值来描述该生态系统的林冠特征。因此,注意 LAI 的时间和空间变化,提高生态模型中 LAI 这个参数的准确性在未来研究中值得引起注意。

### 4.2 有效叶面积指数与 LAI

目前,对 LAI 的测量方法分为直接测量法和间接测量法。直接测量有收集凋落物法,破坏性抽样法和异速增长指数法,这些方法是应用传统的树木解析法进行测定,缺点是毁坏树木样本,且存在一定的取样误差(张红旗等,2004)。间接测量法即利用光学仪器观测辐射透过率进而测量 LAI,比如 LAI-2000 冠层分析仪(Plant canopy analyzer, LI-COR Inc., USA),辐射和冠层结构追踪仪(Tracing radiation and architecture of canopies, TRAC),半球图仪(Digital hemispherical photograph, DHP),Demon 和 Sunfleck Ceptometer 等。其中 TRAC 是目前唯一可以观测集聚指数( $\Omega$ )的仪器(周宇宇等,2003)。许多研究证实,光学仪器法相对于直接方法所测得的叶面积指数值要偏小(Fassnacht *et al.*, 1994)。

Inge 等(2004)指出:半球图法相对于其它光学仪器,不但能够进行 LAI 的测量,还能同时强有效地测量林冠结构。因此我们在众多光学仪器中选择这种方法进行测量。但是,由于本实验中由半球图法测定的为有效叶面积指数,即没有考虑到叶片的集聚效应和半球图中非叶片部分(如树干、树枝等)对 LAI 值的影响。经集聚效应校正后的有效叶面积值

会增大,而校正半球图中树干等非叶面积部分会使有效叶面积值减小。Eriksson 等(2005)研究表明:对于温带落叶阔叶林,由于两种校正的相互抵消并未使有效叶面积指数发生大的变化,因此在温带落叶阔叶林中可以用有效叶面积指数评估实际叶面积指数。校正方法主要应用于针叶林中(Chen,1996; Chen & Cihlar,1996; Kucharik *et al.*,1998),因为在针

叶林中集聚效应和树干等部分对 LAI 的影响非常复杂,例如:有些针叶林只有在一定高度才具有光合作用的能力,造成半球图中此高度以下的部分会增大 LAI,再者,集聚效应在针叶林的枝间和枝内都存在,比较复杂。鉴于以上原因,建议在以后的测量中半球图法最好能与 TRAC 结合使用,用 TRAC 得到集聚指数进行实际叶面积指数的计算(Chen,1996)。

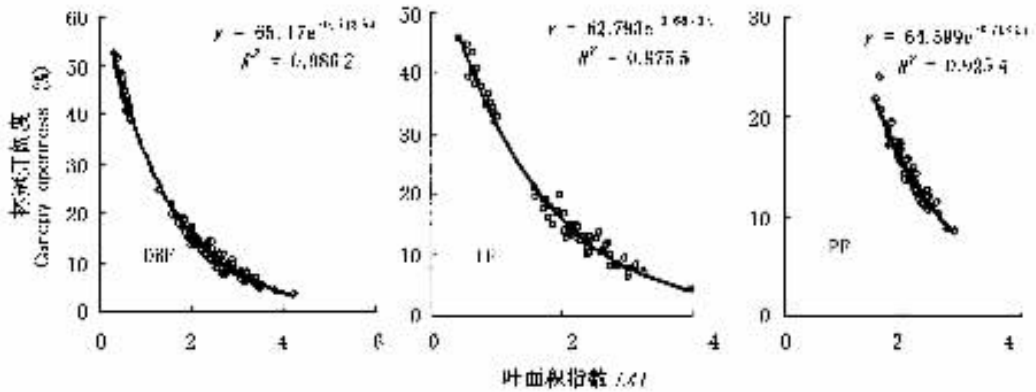


图 4 3 种森林群落叶面积指数和林冠开阔度相关性分析

Fig. 4 Relationship between leaf area index (LAI) and canopy openness for the three forest communities DBF, LF, PF: 见表 1 See Table 1

## 5 结 论

1) DBF 和 LF 两种森林群落的 LAI 和林冠开阔度,以 DBF 的季节动态比较明显。实验中我们发现一部分 LF 遭遇虫害,致使部分叶子提前掉落,这可能是造成结果中 LF 的 LAI 较小和季节动态不明显的原因之一。PF 由于是常绿树种, LAI 和林冠开阔度的变化程度均不明显。但林冠开阔度的变化趋势也是与 LAI 的变化趋势相反。

尽管此次实验在 10 月我们没有进行测量,但由季节动态曲线可以推算出 10 月的 LAI,其值与刘建等(2005)利用 HemiView 于 2002 年 10 月对落叶阔叶林和油松林 LAI 的测量结果基本一致。

2) PF 和 LF 两种人工林的冠层均匀性均大于落叶阔叶天然林 DBF,说明两种人工林在造林时的排列规则,生长状态也比较规则。

由 3 种森林群落的林冠开阔度和 LAI 的回归方程可知 3 种森林群落的林冠开阔度均随着 LAI 的增长而衰减,且呈现指数函数回归的关系。因此在以后的研究中,我们可以试图通过探求林冠开阔度和 LAI 的相关关系,以达到通过林冠开阔度验证 LAI 的目的。

3) 以上研究结果为以遥感途径获取暖温带地区 LAI 提供了地面校正依据,为研究该地区植被林冠的异质性以及这些异质性造成的影响(如林分土壤水分、土壤有机质等的空间变化),以及进一步对该地区林分、景观和区域尺度上碳、水分和通量等方面的模拟提供了基础数据。

## 参 考 文 献

- 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 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, Cihlar J (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 55, 153 - 162.
- Chen LZ (陈灵芝), Huang JH (黄建辉) (1997). *Study on the Characteristics and Function of the Forest Ecosystem in the Warm Temperate Zone* (暖温带森林生态系统结构与功能的研究). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Eriksson H, Eklundh L, Hall K, Lindroth A (2005). Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 27 - 37.

- Fang SZ(方升佐), Xu XZ(徐锡增), Lü SX(吕士行), Tang LZ(唐罗忠), Cao FL(曹福亮)(1998). Leaf area index and biomass productivity of mid- and short rotation poplar plantations for pulp timber. *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, 9, 225 – 230. (in Chinese with English abstract)
- Fang XQ(方秀琴), Zhang WC(张万昌)(2003). The application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index. *Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感)*, 57(3), 58 – 62. (in Chinese with English abstract)
- Fassnacht KS, Gower ST, Norman JM, McMurtrue RE(1994). A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71, 183 – 207.
- Frazer GW, Canaham CD, Lertzman KP(1999). *Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging Software to Extract Canopy Structure and Gap Light Transmission Indices From True-Colour Fisheye Photographs, Users Manual and Program Documentation*. Millbrook, New York.
- Gholz HL(1982). Environmental limits on above-ground net primary production, leaf area and biomass in vegetation zones of the Pacific North West. *Ecology*, 63, 469 – 481.
- Hu LJ(胡良军), Shao MA(邵明安)(2001). Vegetation coverage index in soil and water loss studies. *Journal of Northwest Forestry University(西北林学院学报)*, 16(1), 40 – 43. (in Chinese with English abstract)
- Hui FM(惠凤鸣), Tian QJ(田庆久), Jin ZY(金震宇), Li HT(李海涛)(2003). Research and quantitative analysis of the correlation between vegetation index and leaf area index. *Remote Sensing Information(遥感信息)*, (2), 10 – 13. (in Chinese with English abstract)
- Inge J, Stefan F, Kris N, Bart M, Pol C, Marie W, Frédéricis B(2004). Review of methods for in situ leaf area index determination. I. Theories, sensors and hemispherical photograph. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19 – 35.
- 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.
- Lassoies J, Hinckely TM(1991). *Techniques and Approaches in Forest Physiology*. CRC Press, Inc., Boca Raton.
- Li XW(李小文), Wang JD(王锦地)(1995). *Plant Photon Remote Sensing Model and Parameterizing of Plant Structure(植被光学遥感模型与植被结构参数化)*. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Liu J(刘建), He WM(何维明), Fang ZL(房志玲)(2005). Spatial characteristics of soil moisture and organic matter and light in *Pinus tabulaeformis* forest and *Quercus liaotungensis* forest on Dongling Mountain, Beijing, China. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 25, 2954 – 2960. (in Chinese with English abstract)
- McNaughton KG(1983). Predicting effects of vegetation on changes on transpiration and evaporation. In: Kozłowski TT ed. *Water Deficits and Plant Growth*. Academic Press, London, 718.
- Pierce LL, Running RW(1998). Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology*, 69, 1762 – 1767.
- Running SW, Coughlan JC(1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 125 – 154.
- Vales DJ, Bunnell FL(1998). Comparison of methods for estimating forest overstory cover. I. Observer effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 606 – 609.
- Wang XQ(王希群), Ma LY(马履一), Jia ZK(贾忠奎), Xu CY(徐程扬)(2005). Research and application advances in leaf area index. *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 24, 537 – 541. (in Chinese with English abstract)
- Zhang HQ(张红旗), Chen YR(陈永瑞), Niu D(牛栋)(2004). Retrieving effective leaf area index of conifer forests using Landsat TM images in red soil hilly region. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis(江西农业大学学报)*, 26, 159 – 163. (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH(张佳华)(2001). Study on models for evaluating primary productivity of natural vegetation and crop yield. *Acta Agriculturae Shanghai(上海农业学报)*, 17, 83 – 89. (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZP(张祝平)(1990). The radiation absorption efficiency of photosynthesis of the forest communities in the Dinghu Mountain. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica(植物生态学与地植物学学报)*, 14, 139 – 150. (in Chinese with English abstract)
- Zhao P(赵平), Zeng XP(曾小平), Cai XA(蔡锡安), Peng SL(彭少麟)(2002). Report on measurement of leaf area index of low subtropical forests by using digital plant canopy imager. *Guihaia(广西植物)*, 22, 485 – 489. (in Chinese with English abstract)
- Zhou YY(周宇宇), Tang SH(唐世浩), Zhu QJ(朱启疆), Li JT(李江涛), Sun R(孙睿), Liu SH(刘素红)(2003). Measurement of LAI in Changbai Mountains nature reserve and its result. *Resources Science(资源科学)*, 25(6), 38 – 42. (in Chinese with English abstract)
- Zhu JJ(朱教君)(2003). Method for measurement of optical stratification porosity (OSP) and its application in studies of management for secondary forests. *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, 14, 1229 – 1233. (in Chinese with English abstract)
- Zhu CQ(朱春全), Lei JP(雷静品), Liu XD(刘晓东), Wang FG(王富国), Cheng GZ(成桂珍)(2001). The distribution and seasonal change of leaf area in poplar plantations managed in different ways. *Scientia Silvae Sinicae(林业科学)*, 37(1), 46 – 51. (in Chinese with English abstract)