

林窗内光照强度的测量方法

胡理乐¹, 朱教君², 李俊生^{1,*}, 肖能文¹, 罗建武¹, 屈 冉¹, 范俊韬¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要:林窗内光强存在复杂的时空变化, 对植物更新和生长有着重要影响, 因此, 林窗光照强度的快速测量方法是生态学家十分关注的问题。目前, 测量林窗光强的方法可分为 3 类: (1) 直接测量法采用光量子探头等仪器直接测量光强, 但测量林窗光强异质性时十分费时费力。 (2) 模型估测法通过几何计算可快速估测林窗任意位置光强, 但模型估测法将林窗简化为圆柱体或椭圆柱体, 并忽略了许多林窗光强的影响因素, 这极大影响了它的测量精度。 (3) 相片法采用半球面影像等相片间接计算相片拍摄点的光强, 但测量林窗光强异质性时需要在林窗内拍摄大量相片; 相片法具有较高精度, 可区分直射光和散射光, 其中, 基于半球面影像的林窗光指数 (gap light index) 精度最高, 使用广泛; 基于几何计算的林窗光指数不仅具有较高精度, 且可以快速测量林窗任意位置光强, 该方法适用于林窗光强水平分布格局、垂直结构以及光组成成分 (直射光和散射光) 特征研究。

关键词:林窗光指数; 直射光; 散射光; 时空特征; 半球面影像; 林窗立体结构

文章编号: 1000-0933(2009)09-5056-10 中图分类号: Q142, Q948 文献标识码: A

Reviews on methods of measuring light intensities within forest gaps

HU Li-Le¹, ZHU Jiao-Jun², LI Jun-Sheng^{1,*}, XIAO Neng-Wen¹, LUO Jian-Wu¹, QU Ran¹, FAN Jun-Tao¹

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5056 ~ 5065.

Abstract: Understory light is essential to the establishment and growth of understory plants and varies temporally and spatially within gaps, therefore, quickly measuring light intensities at different positions within gaps is important. Hitherto, there are three types of methods for measuring light intensities within canopy gaps. (1) Direct measurement methods use light sensors to measure light intensities within canopy gaps. It is expensive for measuring light heterogeneity in gaps because direct measurement methods are only possible over a limited time span and number of points and the measurements are laborious to take. (2) Model methods can quickly assess light intensities at any particular position within canopy gaps and, thus, is suitable for studies on light heterogeneity within canopy gaps. However, these models have low accuracy in assess light intensities because they simplify canopy gaps into cylindrical or ellipsoid shaped gaps. (3) Photographic methods are based hemispherical photographs taken with a skyward-facing fish-eye lens fixed on a camera within a canopy gap, and then calculate light intensity at photo point according to one of three indices: the gap fraction, weighted canopy openness or gap light index (*GLI*). Of them, *GLI* has the largest accuracy and has two kinds of methods: hemispherical photograph-based and geometric calculation-based. Hemispherical photograph-based *GLI* are only available for single-point assessments based on one hemispherical photograph and are therefore also time- and labor-consuming for measuring light intensities for numerous points in a gap, particularly in a large gap. Geometric calculation-based *GLI* includes four processes: the measurement of tridimensional shape of canopy gap and the aspect and slope of ground, the calculation of gap coordinates based on these three parameters, the transformation from gap coordinates to hemispherical photograph, and the

基金项目:国家中央级公益性科研院所基本科研业务重点资助项目(2007KYYW04); 国家博士生基金资助项目(20080440438); 国家科技部环保公益性资助项目(200709018)

收稿日期: 2008-09-04; 修订日期: 2009-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijsh@craes.org.cn

computation of *GLI*, direct light and diffuse light. The approach can quickly measure light intensities at any position within canopy gaps. Due to these advantages, the geometric calculation-based *GLI* is a powerful tool for studies on the leveled spatial pattern, the vertical structure and the components (direct and diffuse lights) of light intensities within canopy gaps.

Key Words: gap light index (*GLI*); direct light; diffuse light; spatio-temporal characteristics; hemispherical photograph; tridimensional shape of canopy gap

林窗概念由英国生态学家 Watt 首次于 1947 年提出,主要指森林群落中老龄树死亡或因偶然因素(如干旱、台风、火灾等)导致成熟阶段优势树种的死亡,从而在林冠层造成空隙的现象^[1]。之后,许多学者对林窗概念作了补充和完善^[2~5]。目前,普遍接受的林窗概念有 2 种:林冠林窗和扩展林窗,前者指直接处于林冠层空隙下的土地面积或空间,后者指由林窗边缘木的树干所围绕成的土地面积或空间,它包括了林冠空隙及其边缘到周围树木的树干基部所围成的面积或空间部分^[5,6]。大量研究已表明林窗是森林更新的重要方式之一^[7~9],已成为当前森林生态学研究最活跃的领域之一^[10,11]。

林窗的形成导致光环境发生剧烈的变化^[12]。光是植物进行光合作用并赖以生存的环境因子,影响植物的存活、生长以及形态结构^[13,14];同时,林窗光环境异质性也影响着其它环境因子,如林窗内地表温度、空气温/湿度等热力特征^[15,16]。林窗光环境不仅存在日变化和季节变化^[13,17~19],同时,也表现出复杂的空间异质性^[19,20]。张一平等对热带雨林、季雨林的气候特征进行研究表明,林窗内光照空间分布存在着明显的南北不对称性^[13]。王进欣等对西双版纳人工林林窗的研究结果表明,从林窗中心到林内各梯度上光照强度日变化曲线均为不对称的单峰型,光照在林窗北缘影响范围大于其在南缘,并随着林内的距离呈指数递减^[17]。

除光照强度外,光组成成分的差异也对植物生理生态过程有着重要作用^[21,22]。林窗内光照可分为直射光和散射光^[21],直射光指太阳直接照射到林窗内的光,散射光指从任意方位反射到林窗内的光。直射光受太阳位置的变化、林窗面积、林冠高度、坡度、坡向等因素的影响,由于太阳位置时刻发生着变化,林窗中直射光比散射光存在更复杂的时空变化^[23,24],因此,在林窗不同位置直射光和散射光对全光的贡献不同。直射光和散射光的光量子密度差异大,不同植物对直射光和散射光有着不同的反应^[25],环境因子(如土壤和空气温/湿度)和生物因子(如昆虫丰富度)对直射光和散射光也有着不同反应^[25,26]。因此,研究林下光组成成分对理解林窗中环境异质性及其对植物更新的作用具有重要意义^[27,28]。

林窗光环境的测量是生态学家十分关注的问题,测量方法也比较多。目前,林窗光环境的测量方法可分为 3 类:直接测量法、模型估测法和相片法,本文对这些方法的特点进行了介绍和评论。

2 林窗内光强的测量方法

2.1 直接测量法

采用光量子传感器或光电二极管等仪器对林下光合有效辐射进行直接测量的方法称之为直接测量法,主要有 3 种。

(1) 晴天测量法

晴天测量法使用光量子探头等仪器直接测量晴天正午前后 2h 内的光合有效辐射^[29,30]。太阳位置存在季节性变化极大影响了晴天测量法的结果^[31],有研究表明:该方法往往高估光合有效辐射^[24,32]。

(2) 阴天瞬时测量法

阴天瞬时测量法选择全阴天任意一时刻采用光量子探头等仪器直接测量光合有效辐射。有研究表明:在全阴天测得的瞬时光合有效辐射比晴天测量法具有更好的稳定性,与植物生长季节的总光合有效辐射具有更好相关性^[23,24]。阴天瞬时测量法的结果在一天中是稳定的,因此,该方法在一天中任何时刻的测量结果均可代表一天的平均光合有效辐射^[24,32]。但该方法要求太阳被遮挡、天空条件均匀,并且忽略了冠层间隙的空间分布格局^[33],这些因素对测量结果影响较大。此外,该方法也无法测量林下光照的时空分布。

(3) 连续监测法

连续监测法同时采用多个光电二极管等仪器装配在多通道数据采集器上实现对林下光进行连续监测。该方法可以监测到林下光环境的时空动态变化,增加监测时间有助于更好地描述监测点的光环境。该方法在许多研究中得到应用^[23,34,35]。由于监测时间的加长,连续监测法极大地增加了工作量。

直接测量法所用仪器价格高昂,野外测量费时费力,且不能区别直射光和散射光。一个光量子探头一次只能测量一个位置的光合辐射,因此,采用直接测量法测量林窗光环境空间异质性时需要放置大量光量子探头。通常沿林窗南北和东西轴放置光量子探头^[13,36],且数量十分有限。如果采用直接测量法监测林窗光环境季节性动态变化则需采用连续监测法,但耗费大,且易受人为因素影响。

2.2 模型估测法

与直接测量法相比,模型估测法优点在于可快速估测林窗中任意位置的光环境,目前,估测林窗光环境的模型共有 5 种:

(1) Monsi 和 Oshima 最先提出估测林窗内任意位置直射光和散射光的模型^[37],该模型基于 3 个假设:①林窗形状为垂直圆柱体;②林窗边缘木冠层在同一水平面,冠层厚度为 0;③太阳在林窗的正上方,自西向东经过林窗。林窗内直射光采用光照时长估测,光照时长指林窗内某一点被太阳直接照射的时间长度,一天中光照时长的计算公式如下:

$$T = 12 \times z / 180 \quad (1)$$

式中, T 为一天中的光照时长(h), z 为林窗内测量点在东西方向(太阳路径)上对应的天顶角($^{\circ}$)。

散射光的计算公式为:

$$U = 0.5 \left[1 - \frac{(H/R)^2 + (D/R)^2 - 1}{\sqrt{((H/R)^2 + (D/R)^2 + 1)^2 - 4(D/R)^2}} \right] \quad (2)$$

式中, U , R , H 和 D 分别是测量点与空旷地的散射光比值、林冠林窗直径、冠层在测量点上方的垂直距离和测量点到林窗中心的水平距离。

Monsi 和 Oshima 模型的精度差,该模型没考虑诸多影响林窗光环境的因素,这些因素主要包括林窗立体结构、坡度和坡向、太阳位置、纬度,此外,该模型忽略了林冠孔隙对林窗内光强度的贡献。林窗立体结构可定义为从林窗中心点沿各个方位到林窗边缘的水平距离和到林窗顶点的垂直距离,包括林窗面积、形状和边缘木高这 3 个林窗特征,林窗立体结构可用下式表示:

$$D = f(\theta), H = g(\theta), (0 \leq \theta < 360) \quad (3)$$

式中, θ 是方位角, D 和 H 分别是林窗林冠边缘点到林窗中心点的水平距离和垂直距离。

(2) Nakashizuka 对 Monsi 和 Oshima 的散射光估测模型(公式 2)进行了改进,考虑了来自林冠层小孔隙的散射光,但其它假设同 Monsi 和 Oshima 的模型,计算公式如下^[38]:

$$U = \frac{1-\alpha}{2} \left[1 - \frac{(H/R)^2 + (D/R)^2 - 1}{\sqrt{((H/R)^2 + (D/R)^2 + 1)^2 - 4(D/R)^2}} \right] + \alpha \quad (4)$$

式中, α 是林冠孔隙与林窗面积的比值。

当测量点位于林窗中心时,公式可简化为:

$$U = \frac{1-\alpha}{(H/R)^2 + 1} + \alpha \text{ 或 } U = \frac{1-\alpha}{\pi \cdot H^2/S + 1} + \alpha \quad (5)$$

式中, S 为林窗面积。

公式(4)比公式(2)的测量精确度高,但前者所需的 α (林冠孔隙与林窗面积的比值)难以估测。

(3) Takenaka 对 Monsi 和 Oshima 的直射光模型进行了改进,考虑了林冠层厚度对林窗内直射光的影响,太阳位置的变化、坡度和坡向的影响^[39],因此,具有更高的精度。Takenaka 把林窗假设为具有固定厚度(t)林冠层的垂直圆柱体,半径为 r ,原点坐标为 $(0,0,0)$,林窗高为 1,林冠上层 $z = 1$,林冠下层 $z = 1 - t, 0 < t <$

1. 林窗林冠上层和下层可分别用公式(6)和(7)表示:

$$x^2 + y^2 = r^2, z = 1 \quad (6)$$

$$x^2 + y^2 = r^2, z = 1 - t \quad (7)$$

如果某一时刻太阳与林窗内某一点(x_1, y_1, z_1)的连线在林窗林冠上层和下层平面的交点均位于林窗内,则该点可被太阳照射,交点坐标可表示为:

$$(\cos\alpha \cdot \cos(k\beta) + x_2, -\cos\alpha \cdot \sin(k\beta) + y_2, \sin\alpha + z_1) \quad (8)$$

式中, α 和 β 分别是太阳高度角和方位角,当 k 等于 $(1 - z_1)/\sin\alpha$ 时,交点位于林冠上层平面;当 k 等于 $(1 - z_1 - t)$ 时,交点位于林冠下层平面。

因此,根据 Takenaka 的计算公式可以以某一固定时间间隔判断某一天、月、年中林窗中某一特定点被太阳直接照射的时间长度。

(4) Dai 的模型与前三者相比最大改进之处是考虑了云层覆盖对林窗光环境的影响,并把林窗假设为垂直椭圆体,而前 3 个模型均把林窗假设为垂直圆柱体^[40]。同 Takenaka 的模型一样,Dai 模型考虑了太阳位置的变换。该模型计算光强(GI)的公式如下:

$$GI = \frac{k \times THBEAM \times (1 - CLOUDY)}{4500 \times COVER} \quad (9)$$

式中, k 是常量, $THBEAM$ 是林窗内某测量点全年被太阳直接照射的总时间长度, $CLOUDY$ 是研究地点的云层盖度, $COVER$ 是林冠层平均盖度。

云层盖度需要从研究区附近气象观测站获得,或通过实际测量,但云层盖度的监测是一项长期的工作;林冠层平均盖度也需要测量;当 $COVER = 100\%$ 时,常量 k 等于 1, k 是经验值,Dai 没有介绍如何确定某一林分的 k 值。此外,Dai 模型没有考虑坡度与坡向的影响,因此,Dai 模型的实用性差。

(5) Yoshida 等把林窗垂直投影假设为椭圆,采用多元回归分析建立了林窗某测量点光照强度与其影响因素的经验方程,公式如下^[41]:

$$CLI = B_0 + B_2(S/H) + B_2(DGC) + B_3(DGE)^2 + B_4(YPOSN) + B_5(DN)^2 \quad (10)$$

式中, $B_0 \sim B_5$ 是回归系数, S 、 H 、 DGC 、 DGE 、 $YPOSN$ 和 DN 分别是林窗面积、平均边缘木高、测量点到林窗中心的水平距离、测量点到林窗边缘的最小水平距离、测量点到林窗中心南北方向水平距离和测量点到林窗最北点南北方向水平距离。

该经验方程没有考虑坡度、坡向以及经纬度的影响,因此,在一个地点建立的经验公式无法应用到其它研究地点。

综上所述,上这模型估测法最大的缺点是对林窗结构进行了简化,或简化为垂直椭圆柱体^[37-39],或简化为垂直椭圆体^[40,41]。然而,天然林窗的立体结构十分复杂,形状不规则,不同方位林窗边缘木的高不相同,因此,采用模型估测法测量天然林窗内光环境时时精度较低,所有模型估测法使用均很少。

2.3 相片法

相片法指根据林冠影像计算林下光环境的方法。相片法一般采用超广角照相机垂直向上拍摄林冠影像,然后在图像处理软件中区分透光部分(天空)和遮光部分(林冠、树干等),在假设林冠空隙允许光穿透而非空隙部分不允许光穿透的条件下,依据透光部分和非透光部分的空间分布格局估算林下光环境。常用的相片法有^[42]:①半球面影像法^[43],②冠层分析仪^[23,44],③ 38mm 广角相片,④ 24mm 广角相片,⑤球形显像密度计。相片法受天气的限制,相片拍摄需选择全阴天,半球面影像采用装配鱼镜头的数码相机进行拍摄,拍摄时通常将光圈调至最小,焦距调至无穷远,正确选择曝光时间^[20,45]。

与直接测量法相比,相片法使用简单,野外工作量少,此外,相片法可以计算林下直射光指数和散射光指数,前者分别代表林下与林冠上方直射光的比值,后者代表林下与林冠上方散射光的比值^[46]。目前主要有 2 种模型可以计算林冠上方的直射光和散射光:匀一覆盖天空和标准覆盖天空。匀一覆盖天空假设从天空各个

方向达到林下的散射光相同,标准覆盖天空假设在天顶角的散射光强度是水平方位的 3 倍^[47]。根据林冠上方直射光、散射光和直射光指数和散射光指数便可求得林下直射光和散射光。

计算直射光指数和散射光指数的方法主要有 3 种:林冠间隙比值、加权林冠开阔度和林窗光指数。林冠空隙在整个相片中的比例称之为林冠间隙比值;将林冠照片分成若干个同心圆环,统计各个圆环中林冠空隙所占的比值,越靠近天顶角的圆环赋予更大的权重系数,如此计算得到的林冠开阔度称为加权林冠开阔度。太阳位置对林下直射光具有重要的影响,加权林冠开阔度和林冠间隙比值没考虑太阳位置对林下光的影响,因此,当直射光对林下全光贡献越大时,这 2 个指数估测林下全光的精度越低。相比加权林冠开阔度和林冠间隙比值,林窗光指数精度最高、使用最广泛。林窗光指数考虑了太阳位置和林冠结构^[19,48]。大量研究表明,林窗光指数估测的林下光环境与采用光量子仪器长期监测的结果具有很好的相关性^[31,46,49~52]。基于林窗光指数测量林窗光强的方法有 2 种。

2.3.1 基于半球面影像的林窗光指数(Hemispherical photograph-based GLI)

该方法采用装置鱼镜头的相机在林窗内垂直向上拍摄半球面影像,使用软件 Gap light analyzer (GLA) V2.0^[53] 处理半球面影像计算林窗光指数。

(1) 林窗光指数

林窗光指数测量林窗光强精度较高,在国外使用较多,而国内仍未见使用,在此,对林窗光指数作简单介绍。林窗光指数由 Canham 提出,取值范围为 0~100,计算公式如下^[54]:

$$GLI = (T_{\text{diffuse}} \cdot P_{\text{diffuse}} + T_{\text{beam}} \cdot P_{\text{beam}}) \times 100 \quad (11)$$

式中, P_{diffuse} 和 P_{beam} 分别是林冠上方散射光所占的比重和直射光所占的比重($P_{\text{diffuse}} = 1 - P_{\text{beam}}$), T_{diffuse} 和 T_{beam} 分别是林窗内某一测量点与林冠上方散射光的比值和直射光的比值。

P_{diffuse} 和 P_{beam} 可根据 P_{beam} 与光在大气中的穿透系数(K_T)的经验公式求得^[54]。在林窗内某一测量点采用装配鱼镜头(具有 180°视角)的数码相机垂直向上拍摄半球面影像(图 1),基于该半球面影像 T_{diffuse} 和 T_{beam} 可按照下面公式求得:

$$T_{\text{diffuse}} = \sum_{i=a}^b \cos(A_i) / \sum_{i=1}^N \cos(A_i) \quad (12)$$

式中, N 是半球面影像按角度均分的圈数, $i = 1, \dots, N$ 代表整个半球面影像, $i = a, \dots, b$ 代表林窗的面积, A_i 是第 i 个圆环中心点的角度(图 1)。

$$T_{\text{beam}} = \sum_{t=a}^b \cos(Z_t) / \sum_{t=1}^N \cos(Z_t) \quad (13)$$

式中, Z_t 是 t 时刻太阳天顶角(90°—太阳高度角), $t = 1, \dots, N$ 是生长季节内白天总时间, $t = a, \dots, b$ 是太阳可照射到林窗内测量点的总时间, t 与时间间隔成反比。

(2) 软件 GLA (V2.0)

GLA 是基于半球面影像计算林冠结构参数和林下、林窗内光环境指数的免费软件^[53],也能计算林冠结构参数,主要包括:林冠开阔度、叶面积指数。光环境指数包括:林冠上方直射光、散射光和全光,林下下方直射光、散射光和全光。林冠上方全光与林冠下方全光的比值即林窗光指数。GLA 软件提供了一些比较实用的分析工具,在菜单“Utilities”中可调出这些工具,例如:“Compute Extraterrestrial Irradiance”可按天或月统计太阳辐射量,“Plot Sunpath”可绘制太阳在林窗中的路径,“Plot Sunfleck Distribution”用于统计林下的光斑值。

(1) 打开图像

首先导入图像,支持的图像类型有 BMP, JPG, PCX, 等,其中 BMP 是默认格式。可点击“Open Image”按钮来完成。

(2) 图像注册

图像注册包括指定图像的地理方向和圆形工作区。点击“Image Registration”可开启该操作,在图像中某

一点按下鼠标不松开,拖动鼠标画出一个圆圈,然后松开鼠标,按下鼠标的点和松开鼠标时的点分别是代表起点(Initial Point)和终点(Final Point),起点指定图像的地理方向,这个圆圈便是 GLA 软件的工作区,GLA 的所有计算均基于此圆圈。也可以在右边弹出的窗口(Image Registration)中输入数字指定圆形工作区的起点和终点,最后点击“Apply”或“Ok”按钮保存上述设置。设置结束后便出现 2 个图像框,左边的是“Registered Image”,右边的是“Working Image”。

(3) 图像配置

图像配置指设置相关参数,是比较复杂的一步,点击“Edit Setup Configuration”按键可进入设置界面。需要设置的参数分为 4 类:图像(image)、位置(site)、分辨率(resolution)和辐射(radiation)。图像(image)页面中需要设定图像起始鼠标点(initial cursor point)的方向,如果采用正北方向是磁场北(magnetic north),则需要设定磁场校正值(magnetic correction),可到该网站(<http://www.geolab.nrcan.gc.ca/geomag/apps/mdcale.php>)进行计算;此外,需要设置半球面影像的投影方式,多数鱼眼镜头的投影方式是极坐标(polar)投影。位置(site)页面中需要设定经度、纬度、海拔、坡度、坡向等。分辨率(resolution)页面中需要设置计算太阳位置的时间间隔(solar time step)、植物生长季节和天空(sky regions)被分割的精度。辐射(radiation)页面用于设置直射光、散射光在林冠上方和下方的比值,“Modelled”选项代表该比值根据模型进行计算该比值,“User-Defined”选项代表用户自行设定该比值。

(4) 图像二值化

图像二值化指把图像变成黑白二色图,黑色和白色分别代表非天空区域(包括林冠、树干等)和天空区域(包括林冠林窗和林冠间隙)。点击“Threshold Image”按钮开启该设置,弹出“Threshold”对话框,点击左、右键头调整临界值的大小。通过对比左边的“Registered Image”和右边的“Working Image”,尽量使二者的天空区域相同。如果 2 个图像某些局部区域无法保持一致,则可以使“Image”菜单中的各种工具进行调整。图像二值化过程带有主观性,易引起误差^[55]。

(5) 计算

最后一步是计算,点击“Run Calculations”按钮可开启此功能,之后弹出一个对话框,用于设置计算哪些参数。“Canopy Structure”计算林冠结构参数,“Canopy Structure and Transmitted Gap Light”同时计算林冠结构参数和林下的光环境,后者更耗时。

2.3.2 基于几何计算的林窗光指数(Geometric Colculation-based GLI)

该方法根据林窗立体结构、坡度和坡向计算林窗坐标,然后将林窗坐标转换成半球面影像,最后采用 GLA 软件处理半球面影像计算林窗光指数^[20]。林窗坐标是计算林窗光指数的基础,林窗中不同位置待测点对应着不同的林窗坐标。待测点 P 的林窗坐标指待测点 P 到林窗林冠边缘点的方位角 α 以某一固定角度间隔 S 在 $0 \sim 360^\circ$ 之间递增对应的一组天顶角 Z ,即,点 P 对应的林窗坐标可表示为 $n (= 360/S)$ 对 α 和 Z ;天顶角 Z 指待测点 P 与林窗林冠边缘点连线与垂直向上方向的夹角,角度间隔越小林窗坐标越精细。

林窗坐标可采用装置鱼眼镜头的相机在林窗内垂直向上拍摄林窗的半球面影像来确定林窗坐标,但一张半球面影像只能确定相片拍摄点的林窗坐标,这正是“基于半球面影像的林窗光指数”的缺点,采用该方法测量林窗光环境异质性时需要在林窗中拍摄大量的半球面影像。“基于几何计算的林窗光指数”是“基于半球面影像的林窗光指数”的改进方法,改进之处在于通过几何计算快速获取林窗内任意一点的林窗坐标^[20],而

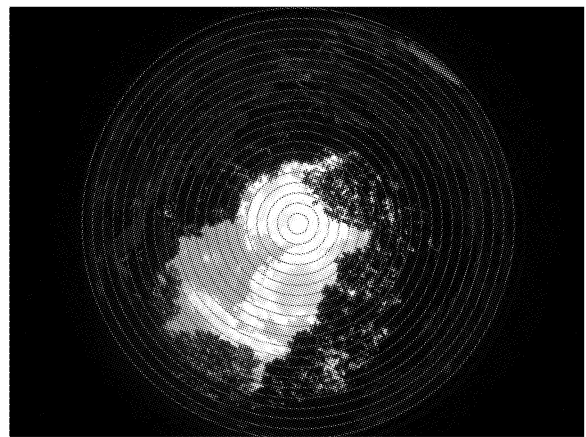


图1 按圆环均分处理的林窗半球面影像

Fig. 1 Hemispherical photograph of a canopy gap partitioned into cirques by the same degree

无需拍摄半球面影像,因此,不受天气限制。该方法有相关计算程序“Computation of Gap coordinates for *GLI*”,从而实现快速计算林窗任意位置光环境的目的。林窗立体结构、坡度和坡向是计算林窗坐标的 3 个关键参数,其中,坡度和坡向的测量比较简单。林窗立体结构虽然可采用森林罗盘仪和角规测量,但这种测量方法费时费力,更难以测得精细的林窗立体结构。而最近提出的双半球面影像法^[36]可简单、客观、精确地计算林窗立体结构。

3 结束语

大量研究已表明,林窗光照强度在林窗形成后发生了剧烈的变化,并表现为复杂的时空分布特征^[13,17,19,56~58],因此,快速测量方法是林窗光强研究的基础。目前,林窗光强测量方法可分为三类:直接测量法、模型估测法和相片法。

在这三类方法中,直接测量法精度最高,但最费时费力,测量仪器成本昂贵^[59],且不能区别直射光和散射光^[42]。受这些缺点的限制,直接测量法监测林窗光强异质性时只能在林窗中布置数量有限的光量子探头,通常沿林窗东北和南北轴布置。模型估测法最简单,对直射光和散射光均有相应的模型,可以快速估测林窗任意位置的光环境;但精度差,因为所有模型估测法均对林窗立体结构进行了简化,且忽略了许多影响林窗光环境的因素。与直接测量法相比,相片法更简单,可计算直射光和散射光^[43];与模型估测法相比,相片法具有更高的精度。相片法通过林冠照片区分林冠层中透光部分(天空)和遮光部分(林冠、树干等),然后依据某种指数(林冠间隙比值、加权林冠开阔度和林窗光指数)估算林下或林窗中的光环境,其中,林窗光指数精度最好,与直接测量法结果有很好相关性。基于林窗光指数估算光强的方法有 2 种:一种是基于半球面影像的林窗光指数,该方法用于研究林窗光强异质性时,需要拍摄大量的相片,尤其对于大林窗,十分费时,此外,半球面影像的拍摄需选择全阴天;另一种是基于几何计算的林窗光指数,该方法无需拍摄半球面影像,因此不受天气的限制,可快速计算林窗任意位置光环境,从而实现快速测量林窗光强异质性的目的。

目前,国内主要采用直接测量法中的连续监测法测量林窗光强^[13,56,57],国外主要采用相片法,其中基于半球面影像的林窗光指数使用最多^[19,23,42,51]。采用直接测量法监测林窗光环境异质性时监测点通常设置在林窗南北和东西 2 个轴^[13,56,57],但样点数量往往很少,因此,难以详细描绘林窗光环境空间异质性。Canham 等把林窗简化为圆柱体,然后采用林窗光指数首次绘制了林窗内地面层光环境空间分布格局的等值线图,讨论了林窗大小、林窗边缘木高等因素对林窗光环境的影响^[19],但简化处理极大地降低了精确度,影响研究结果和结论。Takenaka 利用模型法分析了具有固定厚度林冠的垂直圆形林窗内光照时长的空间分布特征及其季节性动态变化特征,讨论了纬度、坡度和坡向对林窗光环境的影响^[39]。Dai 利用模型估测法分析了林窗内植物生长与光环境的关系^[40]。模型估测法受精度限制,很少被模型提出者以外的其他研究人员采用。上述研究表明,林窗光环境存在复杂时空变化,主要受林窗立体结构(包括林窗面积、形状和边缘木高)、纬度、坡度和坡向等因素影响。

虽然,国内外对林窗光环境特征及光在林窗更新中的作用研究很多^[13,60],由于缺乏快速、精确测量林窗光环境时空异质性的方法,对林窗光环境时空特征的研究结果并不能准确地反映真实情况。林窗光环境空间特征的研究只涉及其水平结构,而林窗光照强度垂直分布格局的研究尚未见报道。林窗中光照强度的垂直分布格局可帮助森林经营与管理者预测和控制光照强度,从而指导森林更新^[48,61]。除光照强度外,光组成成分的差异(直射光与散射光的比值)也对植物生理生态过程有着重要作用^[21,22]。目前,有关林窗光成分研究未见报道。此外,林窗植物更新与光强关系的研究仅涉及林窗内与林下光强差异或林窗中心与边缘光强差异的比较^[62~64],并没有讨论复杂的林窗光强异质性对植物更新的影响,对林窗内复杂的植物更新动态过程的研究仍处于描述性阶段^[65,66]。

只有采用有效的方法监测、分析林窗光照时空分布特征才能更准确、全面地了解光在林窗更新中的作用。“基于几何计算的林窗光指数”可快速、准确测量林窗任意位置全光、直射光和散射光的方法^[20]。该方法适用于林窗光强水平分布格局的研究,可以弥补以往研究中取样点数量过少的问题,此外,该方法在林窗光强垂

直结构特征和光组成成分特征的研究中也具有广泛的应用前景。Hu & Zhu 首次采用该方法研究了林窗地面层光强时空分布格局,绘制了不同大小林窗中光的等值线图,并研究了林窗地面层南北轴直射光和散射光的变化规律^[20]。

References:

- [1] Watt A S. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, 1947, 35: 1—22.
- [2] Runkle J R. Synchrony of regeneration, gaps, and latitudinal differences in tree species diversity. *Ecology*, 1989, 70: 546—547.
- [3] Connell J R. Some processes affecting the species composition in forest gaps. *Ecology*, 1989, 70: 560—562.
- [4] Spies T A, Franklin J F. Gap characteristics and vegetation response in coniferous forests of the Pacific Northwest. *Ecology*, 1989, 70: 543—545.
- [5] Runkle J R. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 1982, 63: 1533—1546.
- [6] Hu L L, Zhu J J, Tan H, *et al.* An improved approach to estimating forest gap size: equiangular elliptic sector method. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26: 455—460.
- [7] Runkle J R. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern United States. *Ecology*, 1981, 62: 1041—1051.
- [8] Qian L W, Wu C Z, Hong W, *et al.* The species diversity and stability of *Tsuga longibracteata* forest gaps and non-gaps. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2005, 25: 202—205.
- [9] Li J L, Zheng X X, Lu Y C, *et al.* Gap regeneration of *Picea crassifolia* natural forest in Qilian Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 124—127.
- [10] Peng S J, Huang Z L, Zhou G Y, *et al.* *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11: 229—235.
- [11] Hubbell S P, Foster R B, O'Brien S T, *et al.* Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science*, 1999, 283: 554—557.
- [12] Song X Z, Xiao W F. Research advances of microsites and regeneration within canopy gap. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42: 114—119.
- [13] Zhang Y P, Wang J X, Liu Y H, *et al.* Study on the sun-shine characteristics of the tropical secondary forest gap in the dry-hot season in Xishuangbanna. *Guihaia*, 2001, 21: 1—8.
- [14] Mountford E P, Savill P S, Bebb D P. Patterns of regeneration and ground vegetation associated with canopy gaps in a managed beechwood in southern England. *Forestry*, 2006, 79: 389—408.
- [15] Denslow J S. Gap partitioning among tropical rainforest trees. *Biotropica*, 1980, 12: 47—55.
- [16] McGuire J P, Mitchell R J, Moser E B, *et al.* Gaps in a gappy forest: plant resources, longleaf pine regeneration, and understory response to tree removal in longleaf pine savannas. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31: 765—778.
- [17] Wang J X, Zhang Y P, Ma Y X, *et al.* Linear character of the sunshine of the gap in the artificial forest in Xishuangbanna. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2000, 9: 27—30.
- [18] Geiger R. The climate near the ground. Cambridge: Massachusetts: Harvard University Press, 1965.
- [19] Canham C D, Denslow J S, Platt W J, *et al.* Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20: 620—631.
- [20] Hu L L, Zhu J J. Improving gap light index (GLI) to quickly calculate gap coordinates. *Can J For Res*, 2008, 38: 2337—2347.
- [21] Endler J A. The color of light in forests and its implications. *Ecological Monography*, 1993, 63: 1—27.
- [22] Skalova H, Krahulec F, During H J, *et al.* Grassland canopy composition and spatial heterogeneity in the light quality. *Plant Ecology*, 1999, 143: 129—139.
- [23] Gendron F, Messier C, Comeau P G. Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92: 55—70.
- [24] Messier C, Puttonen P. Spatial and temporal variation in the light environment of developing Scots pine stands: the basis for a quick and efficient method of characterizing light. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25: 343—354.
- [25] Dusan R, Stjepan M, Igor A, *et al.* Gap regeneration patterns in relationship to light heterogeneity in two old-growth beech-fir forest reserves in South East Europe. *Forestry*, 2007, 80: 431—443.
- [26] Brang P, Von Felten S, Wagner S. Morning, noon, or afternoon: does timing of direct radiation influence the growth of *Picea abies* seedlings in mountain forests? *Annals of Forest Science*, 2005, 62: 697—705.
- [27] Brown N D. The implications of climate and gap microclimate for seedling growth conditions in a Bornean lowland rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 1993, 9: 153—168.
- [28] Coates K D. Conifer seedling response to northern temperate forest gaps. *Forest Ecology and Management*, 2000, 127: 249—269.

- [29] Morgan D C, Warrington I J, Rook D A. Some observations on the spectral distribution characteristics of short-wave radiation within *Pinus radiata* D. Don canopies. *Plant, Cell, and Environment*, 1985, 8: 201—206.
- [30] Messier C, Honer T, Kimmins J P. Photosynthetic photon flux density, red:far-red ratio, and minimum light requirement for survival of *Gaultheria shallon* in western red cedar-western hemlock stands in coastal British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19: 1470—1477.
- [31] Rich P M, Clark D B, Clark D A, *et al.* Long-term study of solar-radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 65: 107—127.
- [32] Parent S, Messier C. A simple and efficient method to estimate microsite light availability under a forest canopy. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26: 151—154.
- [33] Stadt K J, Landhauser S M, Stewart J D. Comment- the effects of direct-beam light on overcast-day estimates of light availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27: 272—274.
- [34] Chazdon R L, Field C B. Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia*, 1987, 73: 525—532.
- [35] Chazdon R L, Fetcher N. Photosynthetic light environments in a lowland tropical rain forest in Costa Rica. *Journal of Ecology*, 1984, 72: 553—564.
- [36] Hu L L, Zhu J J. Determination of the tridimensional shape of canopy gaps using two hemispherical photographs. *Agric For Meteorol*, 2008, doi: 10.1016/j.agrformet.2008.11.008.
- [37] Monsi M, Oshima Y. A theoretical analysis of the succession process of plant community, based upon the production of matter. *Japanese Journal of Botany*, 1955, 15: 60—82.
- [38] Nakashizuka T. Diffused light conditions in canopy gaps in a beech (*Fagus crenata* Blume) forest. *Oecologia*, 1985, 66: 472—474.
- [39] Takenaka A. An analysis of solar beam penetration through circular gaps in canopies of uniform thickness. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 42: 307—320.
- [40] Dai X B. Influence of light conditions in canopy gaps on forest regeneration: a new gap light index and its application in a boreal forest in east-central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 1996, 84: 187—197.
- [41] Yoshida T, Yanagisawa Y, Kamitani T. An empirical model for predicting the gap light index in an even-aged oak stand. *Forest Ecology and Management*, 1998, 109: 85—89.
- [42] Engelbrecht B M J, Herz H M. Evaluation of different methods to estimate understorey light conditions in tropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 2001, 17: 207—224.
- [43] Anderson M C. Studies of the woodland light climate I. the photographic computation of light conditions. *Journal of Ecology*, 1964, 52: 27—41.
- [44] Inc. L-C. Plant canopy analyzer operation manual. LI-COR Inc., Lincoln, NE, 1992.
- [45] Zhu J J, Matsuzaki I, Gonda Y. Optical stratification porosity as a measure of vertical canopy structure in a Japanese coastal forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, 173: 89—104.
- [46] Whitmore T C, Brown N D, Swaine M D, *et al.* Use of hemispherical photographs in forest ecology-measurement of gap size and radiation totals in a Bornean tropical rain-forest. *Journal of Tropical Ecology*, 1993, 9: 131—151.
- [47] Machado J L, Reich P B. Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29: 1438—1444.
- [48] Domke G M, Caspersen J P, Jones T A. Light attenuation following selection harvesting in northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management*, 2007, 239: 182—190.
- [49] Battaglia M A, Mitchell R J, Mou P P, *et al.* Light transmittance estimates in a longleaf pine woodland. *Forest Science*, 2003, 49: 752—762.
- [50] Becker P, Erhart D W, Smith A P. Analysis of forest light environments I. computerized estimation of solar radiation from hemispherical canopy photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 44: 217—232.
- [51] Comeau P G, Gendron F, Letchford T. A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixedwood stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28: 1843—1850.
- [52] Easter M J, Spies T A. Using hemispherical photography for estimating photosynthetic photon flux-density under canopies and in gaps in douglas-fir forests of the pacific-northwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24: 2050—2058.
- [53] Frazer G W, Canham C D, Lertzman K P. 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: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, 1999. <http://www.rem.sfu.ca/forestry/index.htm>.
- [54] Canham C D. An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology*, 1988, 69: 1634—1638.
- [55] Nobis M, Hunziker U. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology*,

2005, 128: 243—250.

- [56] Tan H, Zhu J J, Kang H Z, *et al.* A research review on forest gap disturbance. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26: 587—594.
- [57] Zhang Y P, Wang J X, Liu Y H, *et al.* A preliminary study on the sun-shine characteristics of the secondary forest gap in xishuangbanna in foggy-cool season. *Journal of Tropical Meteorology*, 2000, 16: 374—379.
- [58] Ritter E, Dalsgaard L, Eirhorn K S. Light, temperature and soil moisture regimes following gap formation in a semi-natural beech-dominated forest in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 2005, 206: 15—33.
- [59] Jennings S B, Brown N D, Sheil D. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover, and other measures. *Forestry*, 1999, 72: 59—73.
- [60] Raymond P, Munson A D, Ruel J C, *et al.* Spatial patterns of soil microclimate, light, regeneration, and growth within silvicultural gaps of mixed tolerant hardwood - white pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36: 639—651.
- [61] Lieffers V J, Messier C, Stadt K J, *et al.* Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29: 796—811.
- [62] Chen Z G, Fan D Y, Zhang W F, *et al.* Effects of gap and understory environments on the regeneration of *Quercus Aliena* Var. *Acuteserrata* and *Fagus engleriana*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29: 354—360.
- [63] Collins B S, Battaglia L L. Microenvironmental heterogeneity and *Quercus michauxii* regeneration in experimental gaps. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155: 279—290.
- [64] Unwin G L, Jennings S M, Hunt M A. Light environment and tree development of young *Acacia melanoxylon* in mixed-species regrowth forest, Tasmania, Australia. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233: 240—249.
- [65] Zang R G. Research advances of gap regeneration dynamics. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17: 50—58.
- [66] Liang X D, Ye W H. Advances in study on forest gaps. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2001, 9: 355—364.

参考文献:

- [6] 胡理乐, 朱教君, 谭辉, 等. 一种测量林窗面积的改良方法: 等角椭圆扇形法. *生态学杂志*, 2007, 26: 455~460.
- [8] 钱莲文, 吴承祯, 洪伟, 等. 长苞铁杉林林隙内外群落多样性及稳定性. *福建林学院学报*, 2005, 25: 202~205.
- [9] 李金良, 郑小贤, 陆元昌, 等. 祁连山青海云杉天然林林隙更新研究. *北京林业大学学报*, 2008, 30: 124~127.
- [10] 彭闪江, 黄忠良, 周国逸. 鼎湖山林窗形成特征及其对幼树组成和多样性的影响. *热带亚热带植物学报*, 2003, 11: 229~235.
- [12] 宋新章, 肖文发. 林隙微生境及更新研究进展. *林业科学*, 2006, 42: 114~119.
- [13] 张一平, 王进欣, 刘玉洪, 等. 热带次生林林窗干季光照特征初步分析. *广西植物*, 2001, 21: 1~8.
- [17] 王进欣, 张一平, 马友鑫, 等. 西双版纳人工林林窗光照剖面分布特征. *植物资源与环境学报*, 2000, 9: 27~30.
- [56] 谭辉, 朱教君, 康宏樟, 等. 林窗干扰研究. *生态学杂志*, 2007, 26: 587~594.
- [57] 张一平, 王进欣, 刘玉洪, 等. 西双版纳雾凉季次生林林窗光照特征初步分析. *热带气象学报*, 2000, 16: 374~379.
- [62] 陈志刚, 樊大勇, 张旺锋, 等. 林隙与林下环境对锐齿槲栎和米心水青冈种群更新的影响. *植物生态学报*, 2005, 29: 354~360.
- [65] 臧润国. 林隙(gap)更新动态研究进展. *生态学杂志*, 1998, 17: 50~58.
- [66] 梁晓东, 叶万辉. 林窗研究进展. *热带亚热带植物学报*, 2001, 9: 355~364.