

林窗几何特征的测定方法

胡理乐¹, 李俊生^{1,*}, 吴晓菁¹, 闫伯前², 朱教君³, 罗建武¹, 肖能文¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京农学院食品系, 北京 102206; 3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 林窗面积、形状及边界木高是决定林窗环境异质性的 3 个林窗几何特征, 影响林窗内植物更新。林窗几何特征的快速测量方法是林窗研究的基础, 测量方法可分为 2 类: 基于地面实际测量的地面法和基于林窗林冠照片的相片法。地面法费时费力, 受人为因素影响大, 可测量林冠林窗和扩展林窗的面积, 但不能测量林窗形状和边界木高。相片法具有简单、客观、可重复的优点, 但仅适用于林冠林窗。相片法共有 5 种: “平面相片法”、“航片法”、“半球面影像法”、“双半球面影像法”和“改进的半球面影像法”。前 3 种测量方法只能测量林冠林窗面积; “改进的半球面影像法”可测量林冠林窗面积和形状, 且精度高于前 3 种相片法, 但所需参数最多; “双半球面影像法”可测量林窗面积、形状及边界木高这 3 个林窗几何特征, 且精度较高, 但拍摄要求较高。

关键词: 林窗面积; 林窗形状; 林窗边界木; 半球面影像; 双半球面影像法; 椭圆法; 椭圆扇形法

Rewiews on methods of measuring geometric characteristics of forest gaps involving gap size, gap shape, and the height of canopy trees surrounding the gap

HU Lile¹, LI Junsheng^{1,*}, WU Xiaopu¹, YAN Boqian², ZHU Jiaojun³, LUO Jianwu¹, XIAO Nengwen¹

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beiyuan Road, Chaoyang District, Beijing 100012, China

2 Beijing Department of Food Science, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China

3 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Wuhua Road 72, Shenyang 110016, China

Abstract: Geometric characteristics of forest gaps involving gap size, gap shape and canopy height are major determinants of environmental heterogeneity within gap and then affect plant regeneration and succession. Therefore, quickly measuring methods of the three gap properties lay the foundations for studies of forest gaps. The methods for measuring gap geometric properties can be classified into two kinds: ground-based and photographic. Ground-based methods are based on actual measurement on the ground, while photographic methods are based on the photographs of canopies of canopy trees surrounding the gap. The ground-based methods are viable for both canopy gap size and expanded gap size but are time-consuming and arbitrary, especially for canopy gap size. Moreover, none of the ground-based methods is viable for measuring gap shape or the height of canopy trees surrounding the gap. Compared with the ground-based methods, the photographic methods are more objective and less time-consuming, but all are only suitable for canopy gaps. Of five present photographic methods, the earlier three ones are only viable for canopy gap size. The improved hemispherical photograph method can measure canopy gap size and shape at the same time. Compared with the earlier three ones, the improved hemispherical photograph method is more accurate but needs more parameters. Among all methods for measuring gap geometric characteristics, the two hemispherical photographs (THP) method is the only method that is suitable for measuring gap size, shape and canopy heights at any azimuth (i. e., tridimensional shape of canopy gap) and has good accuracy. In conclusion, THP is a rapid, simple, objective and accurate approach to the determination of tridimensional shape of canopy gap. These advantages make THP a powerful tool for repeatable, comparative, long-term studies of canopy

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务重点项目 (2007KYYW04; 2007KYYW12; 2007KYYW18); 环保公益性项目 (200709018)

收稿日期: 2009-01-21; **修订日期:** 2009-04-29

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

gaps. It is essential to study environmental heterogeneity and plant regeneration within gap taking gap size, shape and canopy heights into consideration at the same time.

Key Words: gap size; gap shape; canopy trees surrounding the gap; hemispherical photograph; two hemispherical photographs (THP) method; ellipse method; equiangular elliptic sectors (EESs)

大量研究表明林窗是森林更新的重要场所^[1-3],也是森林演替的驱动要素^[4-6]。自 Watt^[7] 提出林窗概念至今,国内外已开展了大量林窗研究^[8-9],研究内容主要包括林窗更新^[10]、林窗特征^[11]、林窗环境异质性^[12]、林窗模型^[13-14]等,林窗研究已成为当前森林生态学研究重要内容之一^[15-18]。林窗的形成导致林窗内光、温、水等环境因子发生剧烈变化^[19-20],进而影响林窗内植物萌发^[21]、生长^[22-23]、物种组成^[24]和分布格局^[25]、物种多样性等^[26-27]。林窗内环境因子变化主要受林窗面积、林窗形状和林窗边界木高度这 3 个林窗几何特征的综合影响^[28-30]。因此,这 3 个林窗几何特征的测定方法是林窗研究的基础,也是生态学家十分关注的问题。

综合考虑这 3 个林窗特征与林窗环境异质性的关系有助于揭示林窗内植物更新、演替规律。目前相关研究主要集中在林窗面积^[29,31-33],仅少数研究涉及林窗形状、林窗边界木^[34-36]。同时,这 3 个林窗几何特征测定方法的数量也存在较大差异,测量林窗面积的方法较多^[37],然而林窗形状的测量方法很少,此外,林窗边界木高虽容易测量,但采用角规等方法手动测量多个方位林窗边界木高度却十分费时费力。本文介绍了 3 个林窗几何特征的定义及其测定方法。

1 3 个林窗几何特征的定义

林窗几何特征主要包括林窗面积、形状和边界木高,这 3 个林窗几何特征便构成了林窗立体结构^[30,38],林窗立体结构可定义为由林窗林冠边缘垂直投影到地面所围成的三维空间。

1.1 林窗面积

林窗面积是最重要的林窗特征^[39],目前使用较广泛的定义有 2 种:(1)林冠林窗,指直接处于林冠层空隙下的土地面积或空间;(2)扩展林窗,指由林窗空隙周围树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^[40]。计算森林循环速率^[41]采用林冠林窗,而研究林窗内植物更新、演替时多采用扩展林窗。林窗面积常被用作反映林窗内光环境甚至其它资源有效性的间接指标^[39]。但仅以林窗的面积估测环境因子存在一定的缺陷,面积相同的林窗边界木高度不同时,林窗环境异质性不同。因此,有学者提出了用林窗长轴的长度与边界木高度的比值来表示林窗大小^[41],而且有研究表明,这种方法在研究林窗大小对环境因素和更新的影响上更加确切^[42]。

1.2 林窗形状

林窗形状是林窗重要特征之一^[39],影响林窗环境因子和植物更新^[43-44]。从水平面看,林窗形状不规则,但总体来说,其形状近似于椭圆形^[40,45];从垂直剖面上看,林窗像一个倒圆锥体^[16]。林窗形状越不规则,林窗边缘的环境因子变化越显著,林窗边缘效应越明显^[46]。由于长期以来林窗形状缺乏有效测量方法,一些学者开展林窗形状相关研究时依据林窗长轴与短轴比值将林窗划分为两类:线性与非线性^[47];也有学者应用林窗周长(P)与林窗面积(A)的比值(P/A)表达林窗形状^[46,48],但这一参数受林窗面积影响较大^[38];Hu 和 Zhu^[38]首先采用形状指数 $S = P/(2\sqrt{\pi A})$ ^[49] 量化林窗形状,并得出形状指数 S 不受林窗面积影响的结论。此外,有关林窗边缘效应的研究很少^[50-51]。

1.3 林窗边界木高度

林窗边界木高度也是林窗重要的特征之一,影响进入林窗下层的光照,影响林窗填充方式、物种传播和环境因子等^[52]。林窗边界木的选择是野外调查中十分重要的工作,直接影响林窗面积和形状等特征。林窗边界木指林窗形成后,周围高度达到林冠层的树木^[53]。在野外调查中发现依据这个定义选择边界木时主观性太大。为了避免林窗边界木选择时的主观性,Pedersen 和 Howard^[54] 规定林窗边缘高度大于 2/3 林冠的乔木

为林窗边界木,但这必将增加野外调查工作强度。采用照片确定林窗边界木:在林窗中心垂直向上拍摄林窗林冠照片,冠层在相片最内一圈的乔木即林窗边界木。推荐采用装配鱼眼镜镜头的数码相机拍摄半球面影像选择边界木,因为它具有约 180° 视角,可拍摄大林窗。野外经验表明:该方法即客观又简单。林窗形成后不断有新个体进行填充,小林窗填充方式主要由边界木侧向生长完成,大林窗填充通常由边界木侧生长和苗木生长共同完成^[55]。林窗边界木研究主要集中在对其特征的描述^[36,53],而对边界木与林窗环境以及植物的关系研究很少^[50]。

2 林窗几何特征测定方法

林窗几何特征测量方法可分为 2 类:基于地面实际测量的地面法和基于林窗林冠照片的相片法。目前,大多数方法只能测量林窗面积,少数方法既可测量面积和又可测量形状,仅 1 种方法可测量林窗立体结构的 3 个特征(林窗面积、形状、多个方位边界木高)。本文根据这些方法特点对其进行命名,以便分析比较。

2.1 地面法

(1)椭圆法 将林窗近似成椭圆,测量林窗最长轴(L)和与其垂直的最长轴(W)分别当作椭圆的长、短轴来估测林窗面积($A = \pi LW/4$,图 1)^[1]。椭圆法最早提出,且仍是目前使用较多的林窗面积测量方法。该方法比较简单,但精度差,尤其当林窗形状复杂时^[46,56]。

(2)等角多边形法 测量从林窗中心沿 8 或 16 个方位角到林窗边缘的水平距离,将林窗近似成等角八或十六边形来估测林窗面积^[57-58],分别称作等角八边形法和等角十六边形法,这类方法统称为等角多边形法(图 1)。等角八边形法是最常使用方法之一,其精度通常高于椭圆法,但远比前者耗时。等角十六边形法由等角八边形法演变而来,将林窗细化成更多部分,精度好于等角八边形法,但更费时费力,目前使用较少。等角多边形法的计算公式如下^[37]:

$$A = 0.5 \sum_{i=1}^n l_{i+1} \cdot l_i \cdot \sin(2\pi/n) \quad (1)$$

式中, l 是林窗中心到林窗边缘的水平距离, $l_{n+1} = l_1$, $n = 16$ 或 8 时, A 分别为等角十六或八边形法所计算的林窗面积。

(3)等角椭圆扇形法 野外测量与等角多边形法相同,把相邻 2 个测量距离之间部分当作椭圆扇形来计算林窗面积(图 1)。等角椭圆扇形法可分为等角椭圆扇形 8 分法和等角椭圆扇形 16 分法。等角椭圆扇形法是在等角多边形法基础上提出的方法,其精度高于后者。等角椭圆扇形 8 分法与等角椭圆扇形 16 分法的测量结果不存在显著差异^[37],但后者野外测量比前者更耗时。

(4)三角形法 将林窗分割成若干个三角形,测量每个三角形的边长用于计算三角形面积,以所有三角形面积之和估测林窗面积^[59]。三角形法不需要人为确定林窗中心,精度较高^[59],三角形的数量取决于林窗形状,当林窗很不规律时,所需测量的三角形很多,因此,野外测量也变得十分费时费力^[37]。

2.2 相片法

摄影技术能为林冠结构留下永久记录,因此在森林生态研究中有广泛地运用^[60-61],尤其是具有超广角的鱼镜头所拍摄的半球面影像在森林生态学研究得到了更广泛的应用^[62-64],如:估测林下光^[65-66]和叶面积指数^[67-68]。目前,测量林窗几何特征的相片法有 5 种。

(1)平面相片法 采用普通相机在林窗中同一位置不同高度垂直向上拍摄两张平面照片,2 次拍摄时相

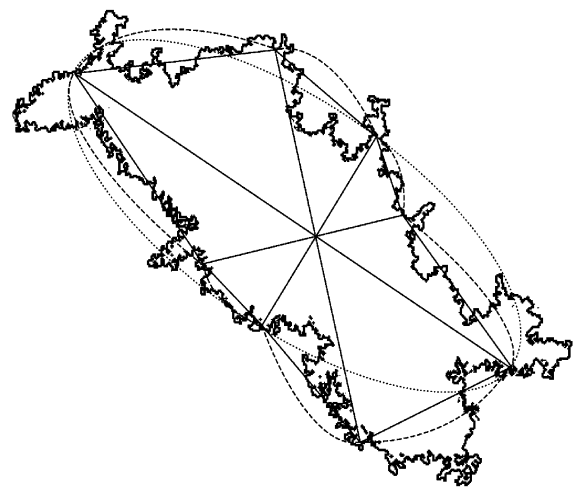


图 1 不同方法测量林窗面积示意图

Fig. 1 Sketch for gap sizes measured by different methods

不规则形状为林窗边缘在水平面上的投影,虚线(····)、实线(—)和破折线(---)分别是椭圆法、等角八边形法和等角椭圆扇形 8 分法所测的林窗面积

机的高差 (ΔL) 是关键参数, 然后根据几何学中的相似原理计算林冠林窗面积^[69], 计算公式如下:

$$A = \frac{PA_h}{P_x \cdot P_y} \cdot \frac{4k \cdot \tan^2 \theta \cdot (\Delta L / (\sqrt{PA_h/PA_l}))^2}{1 + k^2} \quad (2)$$

式中, A 为林冠林窗面积, k 是相片长 (P_y) 与宽 (P_x) 的比值, ΔL 是 2 次拍摄时相机位置的高差, PA_h 和 PA_l 分别是高处和低处拍摄时林冠林窗在相片中的投影面积。

受相机镜头视角的限制, 平面相片法仅适用于小林窗; 此外, 平面相片法需要假定林窗边界木冠层在同一水平面, 这一假设极大影响了平面相片法的精度。根据平面相片法中的相似原理可以计算林窗周长, 但 Yamamoto^[69] 未作介绍。

(2) 航片法 比较冬天拍摄的无叶森林的航天照片和夏天拍摄的带叶森林的航天照片来计算林窗面积及林窗在林分中所占比例^[70]。由于受航片分辨率限制, 航片法仅适用于大林窗, 且受时间限制 (要求冬、夏各拍摄一张航空照片), 因此不能即时得到结果; 此外, 该方法费用很高^[69-70]。航空雷达 (airborne LIDAR) 在大面积森林中快速识别林窗和确定林窗几何特征参数上开始得到了运用^[71], 但精度和价格是该方法最主要的限制。

(3) 半球面影像法 基于一张在林窗内垂直向上拍摄的半球面影像, 根据鱼镜头投影原理估测林窗面积的方法^[72]。多数鱼镜头为极坐标投影原理^[73-74], 即实物相对于拍摄点的天顶角 (θ) 与其在相片中的径向距离 (r , 实物在相片中的投影点到相片中心的距离) 存在线性相关关系 ($\theta/90 = r/R$, R 为当天顶角为 90° 时相片的投影距离)。同平面相片法一样, 半球面影像法需要假设林窗林冠在同一水平面, 林冠高度是唯一参数, 此外, 不考虑坡度的影响, 这些因素极大影响测量精度。

(4) 改进的半球面影像法 改进的半球面影像法增加了坡度和坡向 2 个参数, 需按林窗边界木进行图像处理, 该方法基于 2 个假定: (1) 林窗所有边界木冠层 P_c 点距地面高度 (H) 相同 (图 2); (2) 林窗所处的坡面的坡度 (γ) 和坡向 (β) 恒定, 即不考虑微地形的影响^[75]。

基于图 2 的分析, 把林冠林窗近似为多边形时, 其面积 (A) 和周长 (P) 可分别根据公式 (3) 和 (4) 计算, 采用形状指数 (S)^[38] 计算林窗形状指数。改进的半球面影像法无需假设林窗林冠在同一水平面, 考虑了坡度的影响, 提高了精度, 并可计算林冠林窗形状指数。

$$A = 0.5 \sum_{i=1}^n D_{\alpha(i+1)} \cdot D_{\alpha(i)} \sin(\alpha(i+1) - \alpha(i)) \quad (3)$$

$$P = \sum_{i=1}^n \sqrt{(D_{\alpha(i+1)} - D_{\alpha(i)} \cdot \cos(\alpha(i+1) - \alpha(i)))^2 + (D_{\alpha(i)} \cdot \sin(\alpha(i+1) - \alpha(i)))^2} \quad (4)$$

式中, n 是林窗边界木的数量, 最后一个点 ($i = n+1$) 也为第一个点 ($i = 1$), $\alpha(i)$ 和 $D_{\alpha(i)}$ 分别为第 i 个 P_c 点相对于相机的方位角和水平距离, $\alpha(i)$ 随着 i 增加而增大。

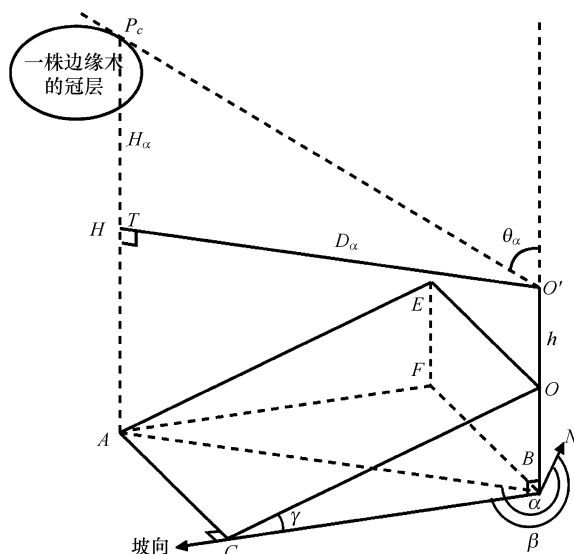


图 2 改进的半球面影像法原理示意图

Fig. 2 Illustration of the principle of improved hemispherical photograph method

ACOE 代表林窗所处的坡面, 其坡度为 γ 、坡向为 β , $ACBF$ 是坡面 ACOE 的垂直投影面; P_c 是任意一株边界木冠层中有着最小天顶角 (相对于半球面影像拍摄点 O') 的点; A 为 P_c 的垂直投影点, H 为 P_c 点距坡面的高度, OO' 为相机距坡面的高度 h , O' 垂直于 AP_c 于 T' 点; $H_\alpha (= P_c T')$ 和 $D_\alpha (= O' T')$ 分别是 P_c 点相对于相机拍摄点的高度和水平距离; 基于这些条件, 可知: $BC = AB (= D_\alpha) \cdot \cos(\angle ABC = \alpha - \beta)$, $OB = BC \cdot \tan(\gamma)$, $AT' = OB + h$, $AT' = D_\alpha \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \tan(\gamma) + h$; 最后可得到, $H_\alpha = H - D_\alpha \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \tan(\gamma) - h$

(5) 双半球面影像法 (two hemispherical photographs, THP) 采用装配鱼镜头的数码相机在林窗内同一位置不同高度处垂直向上拍摄的 2 张半球面影像, 确保 2 次相片拍摄时方位角相同, 根据鱼镜头投影原理和 2 次拍摄点的高差估测林窗立体结构的方法^[38]。该方法可测量林窗立体结构的 3 个特征: 林冠林窗面积、形状以及任意方位林窗边界木林冠的高度。林窗立体结构可用下式表示:

$$D = f(\theta), H = g(\theta), (0 \leq \theta < 360) \quad (5)$$

式中, θ 是方位角, D 和 H 分别是林窗林冠边缘点到测量点的水平距离、垂直距离。

方位角 α 处的 D 和 H 的计算公式如下:

$$D_{\alpha} = d \cdot \tan(\theta_{h,\alpha}) \cdot \tan(\theta_{l,\alpha}) / (\tan(\theta_{h,\alpha}) - \tan(\theta_{l,\alpha})) \quad (6)$$

$$H_{\alpha} = d \cdot \tan(\theta_{h,\alpha}) / (\tan(\theta_{h,\alpha}) - \tan(\theta_{l,\alpha})) + h \quad (7)$$

式中, d 是 2 次拍摄的高差, h 是距地面最近拍摄点到地面的距离, $\theta_{l,\alpha}$ 和 $\theta_{h,\alpha}$ 是方位角 α 处的林窗林冠边缘点分别在低处和高处拍摄的半球面影像中所对应的天顶角, 此天顶角可根据半球面影像的极坐标投影原理求得。

当方位角 α 以某一角度间隔 g 在 0—360 度之间递增时, 林冠林窗的面积 (A) 和周长 (P) 可根据公式 (8) 和 (9) 计算, 方位角 α 处的林冠距地面的高度 ($H_{l,\alpha}$) 可根据公式 (10) 求得。角度间隔 g 越小, 求得的林窗立体结构越精确, 但相片处理更费时。双半球面影像法基于 2 张半球面影像, 2 次拍摄点的高差是唯一参数, 精度较好, 但影响其精度的因素较多^[38]。

$$A = 0.5 \sum_{i=1}^n (D_{i-g} \cdot D_{(i-1) \cdot g}) \cdot \sin(2\pi/h) \quad (8)$$

$$P = \sum_{i=1}^n \sqrt{(D_{i-g} - D_{(i-1) \cdot g} \cdot \cos(2\pi/h))^2 + (D_{(i-1) \cdot g} \cdot \sin(2\pi/h))^2} \quad (9)$$

$$H_{l,\alpha} = H_{\alpha} + D_{\alpha} \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \tan(\gamma) \quad (10)$$

式中, $n = 360/g$, γ 和 β 分别是坡度和坡向。

3 方法的比较

地面法可测量林冠林窗和扩展林窗的面积, 但不能测量林窗形状和边界木高, 且费时费力, 主观性大^[57-59]。理论上可以采用本文介绍的这 4 种地面法估算林窗周长, 但误差很大。椭圆法是最早用于测量林窗面积的方法, 目前仍使用较多, 该方法比较简单, 但精度差^[46]。三角形法具有较高精度, 但由于天然林窗形状复杂, 要确保三角形法的测量精度, 需要将林窗分成许多三角形, 因此, 十分费时费力。等角八边形法最常用之一, 其精度通常高于椭圆法, 但更费时费力。Green^[57]指出等角八边形法会低估林窗面积, 往往比等角十六边形法小 10%—20%。一般来说, 等角椭圆扇形 8 分法比等角八边形法准确, 并且它的测量结果与等角椭圆扇形 16 分法 (最精确的地面法) 没有显著差异, 因此, 等角椭圆扇形 8 分法优于其它地面法^[37]。

与地面法相比, 相片法具有简单、客观、可重复的优点; 由于相片法基于林窗林冠照片, 因此, 相片法只能测量林冠林窗几何特征, 而不能测量扩展林窗几何特征。半球面影像法和平面相片法均需要假设林窗林冠在同一水平面, 这一假设极大影响了他们的精度^[69,72]。航片法最大的优点在于可以快速测量森林中大量林窗的面积, 但不能即时获得结果, 且费用高^[70]。此外, 以上 3 种相片法不能测量林窗形状。改进的半球面影像法可测量林窗面积和形状, 且精度高于前 3 种相片法, 但所需参数最多, 包括林窗边界木高、坡度和坡向。在所有测量林窗特征方法中, 只有双半球面影像法可测量林窗面积、形状以及任意方位边界木高, 且精度较高。

综上所述, 等角椭圆扇形 8 分法是精度较好的地面法; 改进的半球面影像法精度较好, 可测量林窗面积和形状, 但是所有相片法中最费时的一种方法; 双半球面影像法是目前唯一可以测量林窗立体结构 3 个特征的方法, 但拍摄要求较高, 表 1 比较了这 3 种方法的特点及影响因素。

4 结束语

林窗面积、形状和边界木高对林窗环境异质性有着重要影响。尽管有关林窗面积的研究很多, 且已有多种测量林窗面积的方法, 但没有一种方法被广泛采用^[59,76]。林窗形状对林窗环境异质性、植物更新的影响已

表 1 3 种测量林窗特征方法的比较

Table 1 Comparison among three methods of measuring gap characteristics

项目 Item	等角椭圆扇形法 Equiangular elliptic sectors	改进的半球面影像法 Improved hemispherical photograph method	双半球面影像法 Two hemispherical photographs
可测量的林窗特征 Measuring gap properties	林冠林窗和扩展林窗面积	林窗林窗面积和形状	林冠林窗面积、形状及任意方位林窗边界木高
假设 Hypotheses	不需要	林窗林冠距地面的高度相同,坡度和坡向均一	测量林窗面积和形状时不需要假设条件;测量林窗边界木高度时需要假设坡度和坡向均一
设备 Equipment	森林罗盘仪和卷尺	鱼镜头、相机、带水平仪和指南针的三角架、森林罗盘仪	鱼镜头、相机、带水平仪和指南针且可以上下伸缩约 1 m 的三角架
野外测量方法 Field measure	沿 8 或 16 个等间距方位从林窗中心到林窗边缘的距离	垂直向上拍摄 1 张半球面影像、测量坡度和坡向	在林窗内同一位置不同高度垂直向上拍摄 2 张半球面影像,记录 2 相片拍摄的高差
主观性 Subjectivity	较大	客观	客观
操作难易程度 Operating difficulty	费时费力	简单	简单
其它要求 Other requirements	测量林冠林窗面积时,建议由同一人判断林窗林冠边缘点	拍摄相片时保持垂直向上,选择全阴天、日出前或日落后,但亮度要好	拍摄相片时保持垂直向上,同拍摄点的 2 张相片具有相同的方位;选择全阴天、日出前或日落后,但亮度要好;无风

被认识到^[43-44],由于长期缺乏有效测量林窗形状的方法,因此,有关林窗形状的研究较少。只有综合考虑林窗面积、形状和边界木高才能全面、准确地揭示林窗环境异质性,且有助于揭示林窗内植物更新、演替规律。最新提出的双半球面影像法可简单、客观、较精确地测量林窗立体结构,同时也可以用于测量林窗面积、形状和边界木高,在林窗几何相关研究中具有很好的应用前景。但双半球面影像法的测量精度受诸多因素影响,使用时需要注意以下 5 点:(i)必须确定 2 张半球面影像在林窗内同一位置不同高度拍摄,2 个拍摄点的高差是该方法重要的参数,Hu 和 Zhu^[38]指出 0.5 m 是较好的高差;(ii)拍摄时尽可能使镜头垂直向上,尽量确保 2 次拍摄时镜头方向一致,因此,三角架需要带水平气泡且可以在不调整三只脚的情况下上下伸缩至少 0.5 m;(iii)选择无风、全阴天拍摄半球面影像,风会吹动林窗林冠,光照会影响相片质量;(iv)尽可能确保 2 张相片的方向一致,建议使相片正上方为正北方向,那么相片的左、下和右分别对应东、南和西,我们也可以在图像处理软件(如 Adobe Photoshop)中进行调整,以确保 2 张相片的方向一致;(v)必须选择清晰的相片,因此,相片拍摄时要求曝光准确,相片分辨率尽可能高^[38]。

References:

- [1] Runkle J R. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern United States. *Ecology*, 1981, 62: 1041-1051.
- [2] Li J L, Zheng X X, Lu Y C, Lei X D, Liu X X. Gap regeneration of *Picea crassifolia* natural forest in Qilian mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30: 124-127.
- [3] Qian L W, Guo J H, Wu C Z, Hong W, Chen R. Studies on species regeneration dynamics of *Tsuga longibracteata* forest gaps. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 17: 719-722.
- [4] Brokaw N V L. Gap-phase regeneration in a tropical forest. *Ecology*, 1985, 66: 682-687.
- [5] Rankin W T, Tramer E J. Understory succession and the gap regeneration cycle in a *Tsuga canadensis* forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 16-23.
- [6] Kupfer J A, Runkle J R. Early gap successional pathways in a *Fagus-Acer* forest preserve: pattern and determinants. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7: 247-256.
- [7] Watt A S. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, 1947, 35: 1-22.
- [8] Runkle J R. Guidelines and sample protocol for sampling forest gaps. Rep. No. PNW-GTR-283. USDA Forest Service, PNW Res. Stat., 1992,
- [9] Denslow J S, Spies T A. Canopy gaps in forest ecosystems: an introduction. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20: 619-619.

- [10] Chen Z G, Fan D Y, Zhang W F, Xie Z Q. Effects of gap and understory environments on the regeneration of *Quercus Aliena* Var. *Acuteserrata* and *Fagus engleriana*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29: 354-360.
- [11] Liu Q, Wu Y, Wu N. Forest gap characteristic in a coniferous-*Picea likiangensis* forest in the Yulong Snow Mountain Natural Reserve, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14: 845-848.
- [12] Wang J X, Zhang Y P. A review on within-gap micro-environmental heterogeneity and species response. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26: 69-74.
- [13] Yu Z L, Zhao S D. Advances of gap model. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16: 42-46.
- [14] Yan X D, Zhao S D. Modeling growth and succession of northeastern china forests and its applications in global change studies. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24: 1-8.
- [15] Peng S J, Huang Z L, Zhou G Y. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11: 229-235.
- [16] Hubbell S P, Foster R B, O'Brien S T, Harms K E, Condit R, Wechsler B, Wright S J, de Lao S L. Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science*, 1999, 283: 554-557.
- [17] Yuan C M, Liu W Y, Yang G P. Species composition and diversity of lianas in forest gaps of Montane moist evergreen broadleaved forest in Ailao Mts., Yunnan, China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26: 29-35.
- [18] Wang W, Tao J P, Hu K, Li Z F, Song L X. Effects of dwarf bamboo on the regeneration of dominant tree species in gaps of subalpine dark coniferous forest. *Guihaia*, 2008, 28: 52-56.
- [19] Hu L L, Zhu J J. Improving gap light index (GLI) to quickly calculate gap coordinates. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38: 2337-2347.
- [20] Gray A N, Spies T A, Easter M J. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 332-343.
- [21] Yan S J, Hong W, Wu C Z. Gap phase regeneration in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin, Fujian Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40: 25-31.
- [22] Yan X F, Cao M. Effects of forest gap on the seedling growth of a canopy tree species *Pometia tomentosa* in tropical rainforest of Xishuangbanna. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19: 238-244.
- [23] Zang R G, Yu S X, Liu J Y, et al. The gap phase regeneration in a tropical montane rain forest in Bawangling, Hainan island. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19: 151-158.
- [24] Long C L. Species composition and life form feature of vegetation restoration in gaps of Karst forest in Maolan nature reserve, Guizhou Province. *Acta Botanica Yunnanica*, 2007, 29: 201-206.
- [25] Denslow J S, Schults J C, Vitousek P M, Strain B R. Growth responses of tropical shrubs to treefall gap environments. *Ecology*, 1990, 71: 165-179.
- [26] Long C L. Species diversity change pattern in gap gradient in Karst forest in Maolan nature reserve, Guizhou Province. *Guihaia*, 2008, 28: 57-61.
- [27] Zang R G. Research advances of gap regeneration dynamics. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17: 50-58.
- [28] Zhang Y P, Wang J X, Liu Y H, Ma, Y X, Li Y R. A study on the sun-shine Spatial and temporal characteristics in the tropical secondary forest canopy gap in the different season in Xishuangbanna. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2001, 25: 13-17.
- [29] Song X Z, Xiao W F. Research advances of microsites and regeneration within canopy gap. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42: 114-119.
- [30] Canham C D. An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology*, 1988, 69: 1634-1638.
- [31] Zhang C Y, Zhao X H, Zhen J M. Size structure of canopy gaps in broadleaved Korean pine forests in the Changbai Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28: 34-38.
- [32] Naaf T, Wulf M. Effects of gap size, light and herbivory on the herb layer vegetation in European beech forest gaps. *Forest Ecology and Management*, 2007, 244: 141-149.
- [33] Galhidy L, Mihok B, Hagyo A, Rajkai K, Standovar T. Effects of gap size and associated changes in light and soil moisture on the understorey vegetation of a Hungarian beech forest. *Plant Ecology*, 2006, 183: 133-145.
- [34] Xian J R, Hu T X, Wang K Y, Zhang Y L. Characteristics of gap in subalpine coniferous forest in western Sichuan. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23: 6-10.
- [35] Mountford E P, Savill P S, Bebbler D P. Patterns of regeneration and ground vegetation associated with canopy gaps in a managed beechwood in southern England. *Forestry*, 2006, 79: 389-408.
- [36] He Y P, Fei S M, Xu J, Chen X M, Jiang J M, Tu D R. Crown inclination of *Pinus yunnanensis* gap border trees and the influencing factors in the mountain area of southwest of Sichuan, southwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29: 66-71.
- [37] Hu L L, Zhu J J, Tan H, Yu L Z, Hu Z B, Zhang J X. An improved approach to estimating forest gap size: equiangular elliptic sector method. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26: 455-460.
- [38] Hu L L, Zhu J J. Determination of the tridimensional shape of canopy gaps using two hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 862-872.

- [39] Denslow J S. Tropical rainforest gaps and tree species diversity. *Annual Review Ecology and Systematics*, 1987, 18: 431-451.
- [40] Runkle J R. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 1982, 63: 1533-1546.
- [41] Gray A N, Spies T A. Gap size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seedling establishment. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 635-645.
- [42] Liu Q, Yu Y. Effects of gap size on regeneration of subalpine coniferous forests in northwest Yunnan. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2002, 8: 453-459.
- [43] Canham C D, Denslow J S, Platt W J, Runkle J R, Spies T A, White P S. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20: 620-631.
- [44] Lertzman K P, Krebs C J. Gap-phase structure of a subalpine old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21: 1730-1741.
- [45] Lawton R O. Natural disturbance and gap-phase regeneration in a wind-exposed tropical cloud forest. *Ecology*, 1988, 69: 764-777.
- [46] Gagnon J L, Jokela E J, Moser W K, Huber D A. Characteristics of gaps and natural regeneration in mature longleaf pine flatwoods ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187: 373-380.
- [47] McNab W H, Greenberg H C, Berg E C. Landscape distribution and characteristics of large hurricanerelated canopy gaps in a southern Appalachian watershed. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 435-447.
- [48] Battles J J, Dushoff J G, Fahey T J. Line intersect sampling of forest canopy gaps. *Forest Science*, 1996, 42: 131-138.
- [49] Ohman K, Lamas T. Reducing forest fragmentation in long-term forest planning by using the shape index. *Forest Ecology and Management*, 2005, 212: 346-357.
- [50] Xi W M, Zhong Z C, Bi R C. The study of edge effect of the forest communities in Jinyun mountain. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17: 232-242.
- [51] Hong W, Wu C Z, Lin C L. Gap edge effect of the forest communities in Longxi mountain, Fujian Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36: 33-38.
- [52] Yang H X, Xie H S. Study on the reconstruction of disturbance history of *Pinus koraiensis* mixed forest in Changbai mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18: 201-208.
- [53] Xian J R, Hu T X, Wang K Y, Zhang Y B, Zhu X M, Xu J W. Characteristics of gap in subalpine coniferous forest in western Sichuan. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23: 6-10.
- [54] Pedersen B S, Howard J L. The influence of canopy gaps on overstory tree and forest growth rates in a mature mixed-age, mixed-species forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 351-366.
- [55] McCarthy J. Gap dynamics of forest trees: a review with particular attention to boreal forests. *Environmental Reviews*, 2001, 9: 1-59.
- [56] Whitmore T C. Canopy gaps and the two major groups of forest trees. *Ecology*, 1989, 70: 536-538.
- [57] Green P T. Canopy gaps in rain forest on Christmas Island, Indian ocean: size distribution and methods of measurement. *Journal of Tropical Ecology*, 1996, 12: 427-434.
- [58] Brokaw N V L. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. *Biotropica*, 1982, 14: 158-160.
- [59] de Lima R A F. Gap size measurement: the proposal of a new field method. *Forest Ecology and Management*, 2005, 214: 413-419.
- [60] Welch R, Madden M, Jordan T. Photogrammetric and GIS techniques for the development of vegetation databases of mountainous areas: Great Smoky Mountains National Park. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 57: 53-68.
- [61] Naesset E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 52: 49-56.
- [62] Kuusk A, Paas M. Radiometric correction of hemispherical images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 61: 405-413.
- [63] Wagner S. Relative radiance measurements and zenith angle dependent segmentation in hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 103-115.
- [64] Lin D Q, Jiang Z M. Applications of hemispherical photographs in studies of forest ecology. *Taiwan Journal Forest Science*, 2002, 17: 387-400.
- [65] Brown N, Jennings S, Wheeler P, Nabe-Nielsen J. An improved method for the rapid assessment of forest understorey light environments. *Journal of Applied Ecology*, 2000, 37: 1044-1053.
- [66] 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.
- [67] Zhang Y Q, Chen J M, Miller J R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133: 166-181.
- [68] Nobis M, Hunziker U. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128: 243-250.
- [69] Yamamoto K. Estimation of the canopy-gap size using two photographs taken at different heights. *Ecological Research*, 2000, 15: 203-208.
- [70] Nakashizuka T, Katsuki T, Tanaka H. Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. *Ecological Research*, 1995, 10: 13-18.
- [71] Zhang K Q. Identification of gaps in mangrove forests with airborne LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 2309-2325.

- [72] ter Steege H. Hemiphot: a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. the Tropenbos Foundation, Wageningen, The Netherlands. 1993.
- [73] Herbert T J. Area projections of fisheye photographic lenses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, 39: 215-223.
- [74] Hill R. A lens for whole sky photographs. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, 50: 227-235.
- [75] Hu L L, Gong Z W, Li J S, Zhu J J. Estimation of canopy gap size and gap shape using a hemispherical photograph. *Trees-Structure and Function*, 2009, 23: 1101-1108.
- [76] Popma J, Bongers F, Martinez-Ramos M, Veneklaas E. Pioneer species distribution in treefall gaps in Neotropical rain forest: a gap definition and its consequences. *Journal of Tropical Ecology*, 1988, 4: 77-88.

参考文献:

- [2] 李金良, 郑小贤, 陆元昌, 雷相东, 刘晓昕. 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.
- [3] 钱莲文, 郭建宏, 吴承祯, 洪伟, 陈睿. 长苞铁杉林林隙物种更新动态的初步研究. *江西农业大学学报*, 2005, 17: 719-722.
- [10] 陈志刚, 樊大勇, 张旺锋, 谢宗强. 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.
- [11] 刘庆, 吴彦, 吴宁. 玉龙雪山自然保护区丽江云杉林林窗特征研究. *应用生态学报*, 2003, 14: 845-848.
- [12] 王进欣, 张一平. 林窗微环境异质性及物种的响应. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2002, 26: 69-74.
- [13] 于振良, 赵士洞. 林隙(Gap)模型研究进展. *生态学杂志*, 1997, 16: 42-46.
- [14] 延晓冬, 赵士洞. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用. *植物生态学报*, 2000, 24: 1-8.
- [15] 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.
- [17] 袁春明, 刘文耀, 杨国平. 哀牢山湿性常绿阔叶林林窗木质藤本植物的物种组成与多样性. *山地学报*, 2008, 26: 29-35.
- [18] 王微, 陶建平, 胡凯, 李宗峰, 宋利霞. 小径竹对亚高山暗针叶林优势树种林窗更新的影响. *广西植物*, 2008, 28: 52-56, 85.
- [21] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯. 福建万木林中亚热带常绿阔叶林林隙更新研究. *林业科学*, 2004, 40: 25-31.
- [22] 闫兴富, 曹敏. 林窗对热带雨林冠层树种绒毛番龙眼幼苗生长的影响. *应用生态学报*, 2008, 19: 238-244.
- [23] 臧润国, 余世孝, 刘静艳. 海南霸王岭热带山地雨林林隙更新规律的研究. *生态学报*, 1999, 19: 151-158.
- [24] 龙翠玲. 茂兰喀斯特森林林隙植被恢复的物种组成及生活型特征. *云南植物研究*, 2007, 29: 201-206.
- [26] 龙翠玲. 喀斯特森林林隙梯度物种多样性变化规律. *广西植物*, 2008, 28: 57-61.
- [27] 臧润国. 林隙(gap)更新动态研究进展. *生态学杂志*, 1998, 17: 50-58.
- [28] 张一平, 王进欣, 刘玉洪, 马友鑫, 李佑荣. 西双版纳不同季节热带次生林林窗光照时空分布特征. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2001, 25: 13-17.
- [29] 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.
- [31] 张春雨, 赵秀海, 郑景明. 长白山阔叶红松林林隙大小结构研究. *北京林业大学学报*, 2006, 28: 34-38.
- [34] 鲜骏仁, 胡庭兴, 王开运, 张远彬. 川西亚高山针叶林林窗特征的研究. *生态学杂志*, 2004, 23: 6-10.
- [36] 何亚平, 费世民, 徐嘉, 陈秀明, 蒋俊明, 涂代伦. 川西南山地云南松林窗边界木偏冠现象与影响因素. *北京林业大学学报*, 2007, 29: 66-71.
- [37] 胡理乐, 朱教君, 谭辉, 于立忠, 胡志斌, 张金鑫. 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.
- [42] 刘庆, 吴彦. 滇西北亚高山针叶林林窗大小与更新的初步分析. *应用与环境生物学报*, 2002, 8: 453-459.
- [50] 奚为民, 钟章成, 毕润成. 四川缙云山森林群落林窗边缘效应的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17: 232-242.
- [51] 洪伟, 吴承祯, 林成来. 福建龙栖山森林群落林窗边缘效应研究. *林业科学*, 2000, 36: 33-38.
- [52] 阳含熙, 谢海生. 长白山红松混交林干扰历史的重构研究. *植物生态学报*, 1994, 18: 201-208.
- [53] 鲜骏仁, 胡庭兴, 王开运, 张远彬, 朱雪梅, 徐精文. 川西亚高山针叶林林窗边界木特征的研究. *林业科学研究*, 2004, 23: 636-640.
- [64] 林登秋, 江智明. 半球面影像在森林生态研究的应用. *台湾林业科学*, 2002, 17: 387-400.