应用生态学报 2015年12月 第26卷 第12期
Chinese Journal of Applied Ecology, Dec. 2015, **26**(12): 3611-3618

基于机载激光雷达的中亚热带常绿阔叶林林窗特征*

刘 峰[1] 谭 畅[1**] 王 红[1] 张 江[1] 万 颖[2] 龙江平[1] 刘芮希[1]
([1]中南林业科技大学理学院, 长沙 410004; [2]湖北民族学院科技学院, 湖北恩施 445000)

摘 要 机载激光雷达(LiDAR)是一种新型主动式遥感技术,能直接获取多尺度高精度的冠层三维结构信息,将其推广到森林干扰生态学领域,可为林窗研究提供应用支撑.以湖南中亚热带常绿阔叶林为研究对象,利用小光斑LiDAR数据进行林窗识别和几何特征估测.选择合适的分辨率和内插方法生成冠层高程模型,采用计算机图形学方法估测林窗面积、边界木高度和形状指数,并进行野外观测验证.结果表明:林窗识别率为94.8%,主要影响因素是林窗面积和林窗形成木类型;估测的林窗面积和边界木高与野外观测值呈较强线性相关,R^2值分别为0.962和0.878,其中估测的林窗面积平均比野外观测值高19.9%,估测的林窗边界木高度平均比野外观测值低9.9%;区域内林窗密度为12.8个·hm^{-2},占森林面积13.3%;林窗面积、边界木高和形状指数的平均值分别为85.06 m^2、15.33 m和1.71,区域内多为较小面积、边缘效应不太显著的林窗.

关键词 机载激光雷达;林窗特征;中亚热带;常绿阔叶林
文章编号 1001-9332(2015)12-3611-08 **中图分类号** S718.5; TN958 **文献标识码** A

Characterization of mid-subtropical evergreen broad-leaved forest gap based on light detection and ranging (LiDAR). LIU Feng[1], TAN Chang[1], WANG Hong[1], ZHANG Jiang[1], WAN Ying[2], LONG Jiang-ping[1], LIU Rui-xi[1] ([1]*College of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha* 410004, *China*; [2]*College of Science and Technology, Hubei University for Nationalities, Enshi* 445000, *Hubei, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(12): 3611-3618.

Abstract: Light Detection and Ranging (LiDAR) is an active remote sensing technology for acquiring three-dimensional structure parameters of vegetation canopy with high accuracy over multiple spatial scales, which is greatly important to the promotion of forest disturbance ecology and the application on gaps. This paper focused on mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Hunan Province, and small footprint LiDAR point data were adopted to identify canopy gaps and measure geomagnetic characteristics of gaps. The optimal grid model resolution and interpolation methods were chosen to generate canopy height model, and the computer graphics processing was adopted to estimate characteristics of gaps which involved gap size, canopy height and gap shape index, then field investigation was utilized to validate the estimation results. The results showed that the gap recognition rate was 94.8%, and the major influencing factors were gap size and gap maker type. Linear correlation was observed between LiDAR estimation and field investigation, and the R^2 values of gap size and canopy height case were 0.962 and 0.878, respectively. Compared with field investigation, the size of mean estimated gap was 19.9% larger and the mean estimated canopy height was 9.9% less. Gap density was 12.8 gaps · hm^{-2} and the area of gaps occupied 13.3% of the forest area. The average gap size, canopy height and gap shape index were 85.06 m^2, 15.33 m and 1.71, respectively. The study site usually contained small gaps in which the edge effect was not obvious.

Key words: light detection and ranging (LiDAR); gap characteristics; mid-subtropics; evergreen broad-leaved forest.

* 湖南省自然科学基金面上项目(2015JJ2201)、湖南省教育厅科学研究项目(13B153,14C1182)、湖南省高校创新平台开发基金项目(13K069)和2015中南林业科技大学教学改革研究项目资助.
** 通讯作者. E-mail: Tanchang1017@sina.com
2015-03-17 收稿,2015-09-15 接受.

林窗是一种经常发生的、源于自然和人为的树冠干扰,即主林层树木因为某种生物性内因(如树木的年龄和根系特征)、气候外力(如大风、雪、水灾、泥石流等)或二者的综合作用而发生的生物性外力(如树木翻倒、折干、虫害等),从而导致森林中相对连续的林冠层面出现间断,进而影响到林窗的环境因子变化、小尺度林分格局、群落更新演替过程的现象[1].林窗研究作为森林循环理论的基础之一,具有重要的理论和实践意义[2-3].研究内容主要包括林窗特征、林窗形成原因、林窗环境异质性、林窗对植物多样性的影响,以及林窗与森林可持续经营的关系等[4].研究对象主要包括我国的温带红松阔叶林、亚高山针叶林、中亚热带常绿阔叶林、亚热带山地雨林、马尾松人工林等[5-9].

近年来,利用遥感数据进行的林窗研究已经涉及到林窗特征(面积、形状和边界木高度)测量、林窗时空分布推演以及林窗动态(生成和闭合)分析等方面,取得了丰硕的研究成果[10-14].但是,随着研究的深入以及森林群落长期定位监测的需要,传统遥感技术在监测林窗特征时逐渐呈现出局限性:1)在计算一些冠层结构参数时,由于无法进行复杂的森林三维结构信息提取,导致群落量测的空间异质性;2)未能很好解决单个林窗样地尺度与多个林窗景观尺度之间的推译问题;3)缺乏对微生境多样性监测的能力,仍需人工实地测量环境因子.

机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)是一种新兴的主动式遥感技术,能在多时空尺度上获取森林生态系统高精度的植被结构信息、三维地形特征[15].LiDAR 对林窗动态变化的精确、高效监测和模拟在认识这些变化如何影响林窗形成机制、干扰状况、更新规律,并促进生物多样性保护等方面具有巨大潜力.虽然有关 LiDAR 技术在林窗研究中的应用已有介绍和讨论[16-17],但是,国内还少有文章以机载 LiDAR 数据为基础,讨论如何在森林循环理论研究中应用其技术优势,解决生态学问题.本文以湖南省雪峰山南麓武冈林场的中亚热带常绿阔叶林为研究对象,探讨了机载 LiDAR 估测林窗数量、林窗面积、林窗边界木高和林窗形状等特征的能力,并对估测精度进行评价,揭示该区域内林窗的基本特征.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

研究地区位于湖南省雪峰山东南部的武冈林场(26°25′—27°00′ N,110°22′—113°3′ E),地处祁邵丘陵区,保留了约 1300 hm^2 的原始次生常绿阔叶林,三面环山,南高北低,海拔多在 550~850 m,最高峰海拔 1378 m.该地区属中亚热带季风湿润气候,雨量充沛,年平均气温 16 ℃,年均降水量约 1400 mm,山上相对湿度大,无霜期约 250 d,土壤以山地红壤和黄棕壤为主.植被类型以常绿阔叶林为主,另有落叶阔叶林、暖性针叶林和常绿落叶阔叶混交林,群落上层乔木有甜槠(*Castanopsis eyrei*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)、锥栗(*Castanea henryi*)、云山白兰(*Michelia platypetala*)、水青冈(*Fagus longipetiolata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、朴树(*Celtis sinensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等.主要灌木有南方荚蒾(*Viburnum fordiae*)、山茶(*Camellia japonica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、映山红(*Rhododendron simsii*)、微毛柃(*Eurya hebeclados*)等.

1.2 试验数据

采用 LiteMapper5600 系统获取机载 LiDAR 点云数据,时间为 2011 年 6 月,航带间重叠率约 20%.LiDAR 点云垂直精度约 0.6 m,平面精度约 0.5 m,平均密度为 4~6 个·m^{-2}.高分辨率光学遥感 QuickBird 影像获取时间为 2012 年 7 月.LiDAR 点云数据为 LAS 格式,投影方式为 UTM,参考椭球为 WGS84,每个激光点包含坐标值、高度值、强度值、回波次数等信息.

根据机载 LiDAR 扫描范围进行野外调查,围绕林区山体不同坡向设置 11 条至上而下宽 20 m、长 100~400 m 不等的 4 类调查样地(表 1).采用卷尺和罗盘仪按照等角椭圆扇形 8 分法(Isogonism

表 1 样地特征
Table 1 Characteristics of the sampling plots

样地 Plot	海拔 Altitude (m)	面积 Area (m^2)	坡度 Slop (°)	坡位 Position	坡向 Aspect	林分类型 Forest type	郁闭度 Canopy density
A	450~900	17600	10~20	中坡	阳坡	常绿阔叶林	0.7
B	400~600	11400	5~10	山谷	阳坡	常绿阔叶林+针阔混交林	0.8
C	900~1200	8950	20~25	山脊	阳坡	常绿落叶阔叶混交林	0.7
D	>1200	6600	25~40	山顶	阴坡	落叶阔叶林	0.7

Ellipse Sector, IES8)[4]沿顺时针等间距方位测量从林窗中心到边缘的距离,确定林窗面积;采用角规法或伸缩式测高器测量林窗边界木高度;DGPS 或全站仪测量林窗中心海拔和位置;共调查林窗 58 个.

1.3　研究方法

1.3.1 机载 LiDAR 数据误差校正　机载 LiDAR 数据质量是要考虑的一个重要问题.误差来源主要包括系统误差和随机误差.试验区由多条航带覆盖,航带间有一定的旁向重叠,由于误差的存在,不同航带间会出现高程相对偏移,直接影响林窗特征提取精度.采用 Latypov[18]提出的基于数据本身的航带间重叠区误差分析与校正方法,提高数据的精度,并修正航带的变形.1)选择平坦裸地的地表点为误差分析的对象,将相邻航带间的重叠区分成 1、9、25 m^2 大小的若干采样单元,分别对应两航带的数据子集,计算高程测量的平均值、方差及真实值;2)裸地表面高程(地形高度+草本植被高度)的变化范围在 0~200 cm,因此可以认为高程大于 200 cm 的数据点为噪音或坏数据,通过滤波处理,减少数据中的随机误差;3)对于系统误差,结合航带间的相对偏移量,建立误差变量方程组,通过最小二乘法解出纠正向量,再利用其对各航带数据进行系统误差消除,使航带间平均高程差值在-2~2 cm.

1.3.2 地物表面模型的建立　机载 LiDAR 点云最直接获取的地表结构是数字地表模型(digital surface model, DSM).在林地范围内,DSM 与数字高程模型(digital elevation model, DEM)的差值构成冠层高程模型(canopy height model, CHM),对 CHM 依据计算机图形学方法实现林窗识别.另外,LiDAR 生成的高精度 DEM 能为林窗分析提供米级地形特征,林窗特征研究的前提之一是生成包括 DEM、DSM 和 CHM 在内的地物表面模型.学者已就 LiDAR 点云生成地物表面模型问题进行了探讨[19-21],并指出点云滤波方法、栅格分辨率、栅格内插方法、点云密度和地形起伏程度等方面的因素应综合考虑.

常见的点云滤波方法有线性预测法、倾角滤波、形态学滤波[21]等.考虑到区域地形与数据处理效率,本试验采用 TerraScan 软件的自适应 TIN 模型滤波方法(线性预测法的改进型),将原始 LiDAR 点云分类成地表点云和非地表点云,用以生成 DEM 和 DSM.

DEM 通常采用不规则三角网(TIN)建模,DSM 中包含密度较高且散乱分布的植被点,若也采用 TIN,不但增加了建模复杂度,而且易增加林窗边缘高程的误差,TIN 模型转化成栅格模型也会带来额外误差,试验中 DEM 和 DSM 统一采用栅格建模.栅格分辨率直接影响栅格内插精度及林窗识别,格网尺寸与其包含点云的个数呈线性关系,选择过大尺寸的格网,易造成栅格化过程中的信息丢失,反之则会过度内插.选择格网尺寸应大致与点云平均距离相当,试验从 0.1、0.2、0.25、0.5、0.75 和 1 m 的格网尺寸中选择合适的 DEM 和 DSM 栅格分辨率,标准是包含 1 个以上点云的单个格网数占总格网数的比例要适当[22].CHM 是 DEM 和 DSM 栅格之间的差值,所以三者的分辨率应一致.

地物表面模型的内插是根据已知若干相邻参考点的高程求出待定点上的高程值.内插方法有多种,根据点云的质量和地物环境表现出的效果各有不同,对表 1 中 4 种样地类型比较反距离权重法(inverse distance weighted, IDW)、样条法(splines, Spline)、普通克里格法(ordinary Kriging, OK)、自然临近法(natural neighbor, NN)、局部多项式法(local polynomial, LP)5 种内插方法的适应性.内插邻域选择最大距离为 10 个点云的圆形区域.采用十折交叉验证法计算地物表面模型的内插误差($RMSE_{inte}$):

$$RMSE_{\text{inte}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Z_i^{\text{inte}} - Z_i^{\text{real}})^2 / n} \qquad (1)$$

式中:Z_{inte}为内插生成的高程值;Z_{real}为实际高程值.

1.3.3 林窗识别　林窗本质上是森林冠层的某种状态,已有学者从 CHM 角度对林窗特征进行研究[23-24].为提高林窗特征估测的精度和效率,试验分为 2 步骤:1)树冠识别:应用局部最大值滤波法[25]在已消除"噪声"的 CHM 上提取树冠顶点,根据样地单木树冠的特征,滤波核设定成半径为 7 个像素大小的圆形;采用同期高分辨率遥感影像人工解译进行树冠顶点的验证,根据验证后的树冠顶点,再利用标记控制分水岭算法[26]在 CHM 上进行树冠边缘提取.2)林窗特征提取:对树冠区域求补集,剔除林地中溪流沟壑、岩石裸地、池塘或建筑物等非植被区域,对林窗边界的多边形进行拓扑关系的重建和优化[27],闭合的多边形即可能为林窗,生成林窗多边形矢量图层(gaps polygon layer, GPL)(图 1);对林窗边缘部分的单木点云进行分割[28-29];单木点云的高程分位数反演边界木高,选择大于 2/3 林分高度的单木为林窗边界木.

采用野外观测和高分辨率遥感影像解译相结合的方式在 GPL 上进行验证.林窗识别的条件:1)多边形面积在4~1000 m^2[2];2)多边形剖面与相邻树

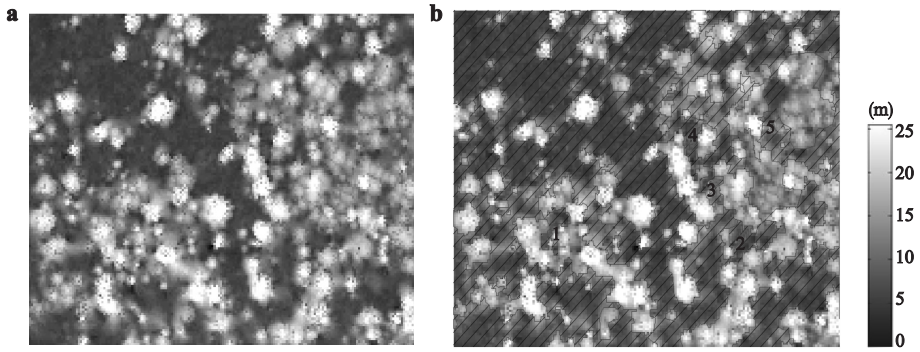


图 1 基于 CHM 的林窗识别

Fig.1 Gaps identification based on CHM.

a) 冠层高程模型 Canopy height model (CHM); b) 林窗多边形矢量图层 Gaps polygon vector layer (GPL). 阴影部分为树冠区域的补集,有标记的多边形即是符合识别条件的林窗 Delineated canopy supplementary set (polygons filled with bias lines) overlaid on CHM, identified gaps were marked.

冠高度差在 5 m 以上[23];3)多边形外缓冲区 10 m 以内为树冠.

依据 Ohman 等[30]的定义测定,利用 ArcGIS 软件在林窗矢量图上计算每个林窗的形状指数:

$$S_i = P_i / 2\sqrt{\pi A_i} \quad (2)$$

式中:A_i和 P_i为林窗面积和周长,该值不受林窗面积的影响,能较好地描述林窗形状[4].S_i越高,林窗内部受到的边缘效应越大.

2 结果与分析

2.1 地物表面模型分辨率

以覆盖 1 个以上点云的格网数占总格网的比例(C1P)为依据选择地物表面模型的分辨率.在不同类型样地的三维点云栅格化过程中,C1P 随着格网尺寸增大而增大(图 2),其中植被点云的 C1P 增加幅度更加明显,当格网尺寸小于0.25 m时,植被点云和地面点云的 C1P 控制在 10%以内.过小尺寸的格网不仅造成数据过度内插,而且也增加时间复杂度,所以试验选择 0.25 m 为 DSM 和 DEM 的分辨率,CHM 的分辨率也应为 0.25 m.

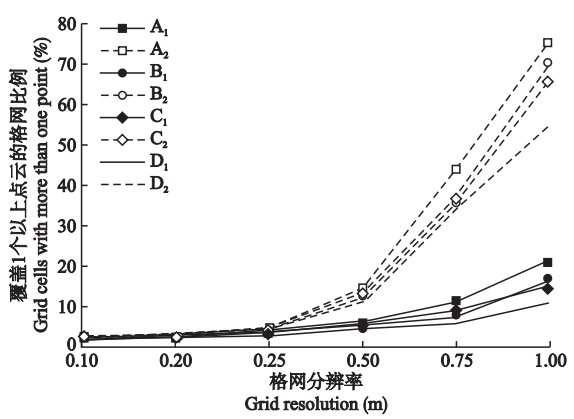


图 2 地物表面模型栅格分辨率选择

Fig.2 Feature surface model grid resolution selection.

A~D: 样地 Plots; 1) 地面点云 Ground points; 2) 植被点云 Vegetable points.

2.2 栅格内插方法选择

依据 Guo 等[20]的研究,试验以地形起伏度和点云密度为自变量,内插误差 $RMSE_{inte}$为因变量进行回归分析.根据不同类型样地,分别比较 IDW、Spline、OK、TIN 和 LP 等内插方法在生成 0.25 m 分辨率地物表面模型时的误差(表 2).缓坡常绿阔叶林(A 样地)的 $RMSE_{inte}$最小,陡坡落叶阔叶林(D 样地)的最大.总体上,植被点云的 $RMSE_{inte}$比地面点云大,而且随着样地坡度、树种混交度的增加,$RMSE_{inte}$增大,R^2呈下降趋势.总体而言,植被点云内插精度的排序为:IDW>LP>OK>Spline>NN,地面点云内插精度的排序为:OK>IDW>LP>Spline>NN.试验分别选择 IDW 和 OK 方法对 DSM 和 DEM 进行内插.

2.3 林窗识别

LiDAR 林窗总体识别率为 94.8%(表 3),其中 C 和 D 样地的林窗识别率最高,A、B 样地次之.山脊和山顶部分(C、D 样地)的林窗面积比较大,且分布较分散,LiDAR 识别率高,山坡中部(A 样地)的一处漏判原因是林窗矢量图中将相邻两个林窗联成了一个,山谷部分(B 样地)林层多为复层结构,由少量(1~2 株)枯立木形成的较小面积的林窗不易被 LiDAR 识别,造成两处漏判.

为判断影响识别率的主要因素,以林窗面积、林窗形成木类型(翻倒木、折干、枯立和折枝)、林窗形成木数量、LiDAR植被点云密度、坡度、坡向为自变

表 2　地物表面模型内插方法的误差比较
Table 2　Comparison of error of feature surface model interpolation

样地 Plot	估测变量 Predictor	反距离权重法 Inverse distance weighted		样条法 Spline		普通克里格法 Ordinary Kriging		自然临近法 Natural neighbor		局部多项式法 Local polynomial	
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
A	R^2	0.84**	0.87**	0.82**	0.86**	0.84**	0.87**	0.79**	0.79**	0.83**	0.84**
	$RMSE_{inte}$ (m)	2.02	0.24	2.12	0.24	2.07	0.23	3.11	0.38	2.03	0.25
B	R^2	0.84**	0.87**	0.83**	0.87**	0.84**	0.88**	0.80**	0.78**	0.84**	0.83**
	$RMSE_{inte}$ (m)	2.16	0.24	2.31	0.26	2.65	0.21	3.04	0.39	2.15	0.25
C	R^2	0.82**	0.87**	0.78**	0.87**	0.80**	0.87**	0.77**	0.82**	0.82**	0.84**
	$RMSE_{inte}$ (m)	2.58	0.23	2.79	0.28	2.68	0.20	2.82	0.35	2.59	0.24
D	R^2	0.78**	0.73**	0.71*	0.64*	0.79**	0.76**	0.69*	0.58*	0.76**	0.72**
	$RMSE_{inte}$ (m)	3.43	0.38	3.49	0.38	3.39	0.36	3.61	0.51	3.47	0.38

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. Ⅰ: 植被点云内插误差 Vegetable points interpolation error; Ⅱ: 地面点云内插误差 Ground points interpolation error, and values outside.

表 3　基于 LiDAR 的林窗识别
Table 3　Gaps recognition using LiDAR

样地 Plot	样地面积 Plot area (m^2)	林窗个数 Gaps number		识别率 Recognition (%)	LiDAR 估测结果 LiDAR estimation results	
		LiDAR 识别 LiDAR identification	野外观测 Field survey		林窗面积 Gaps area (m^2)	边界木高 Canopy height (m)
A	17600	20	21	95.2	53.85	12.41
B	11400	17	19	89.5	65.00	15.09
C	8950	10	10	100	115.50	12.31
D	6600	8	8	100	166.87	12.03
总计 Total	44550	55	58	94.8	100.24	13.22

表 4　二元 Logistics 回归方程系数和共线性检验结果
Table 4　Results of Logistic regression model coefficients and collinearity

模型系数 Coefficient	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	Wald 统计量 Wald statistics	显著性 Significance	优势比 Odds rate	方差膨胀因子 Variance expansion factor
常量 Constant	−3.454	3.075	1.262	0.022	0.032	
林窗面积 Gap area	0.269	0.147	3.338	0.038	1.308	1.754
林窗形成木类型 Gap marker	−0.035	0.580	0.004	0.013	0.996	1.291

量,林窗识别正确与否为因变量,以向前步进方法做二元 Logistic 回归分析(表 4).回归方程为:

$$P(Y) = 1 + e^{\wedge} - (-3.454 + 0.269^{*} area - 0.035^{*} marker)$$

式中:*area* 为林窗面积;*marker* 为林窗形成木类型. Hosmer-Lemeshow 检验的卡方为 10.608(小于临界值 15.507),显著性为 0.429,说明模型拟合效果和显著性都很好.方差膨胀因子<2,说明自变量之间的共线性干扰较小.根据自变量的筛选和优势比取值,说明影响林窗识别率的主要因素是林窗面积和林窗形成木类型,且前者的贡献率比后者大.

对比不同样地的 LiDAR 和野外观测林窗面积中位数(图 3),说明 LiDAR 估测的林窗面积通常比野外的大,C 和 D 样地的差别比较明显,而 A 和 B 样地的差别则较小.

用配对 *T* 检验法比较 LiDAR 与野外观测林窗面积的差异(表5).两者配对的面积差值正态分布

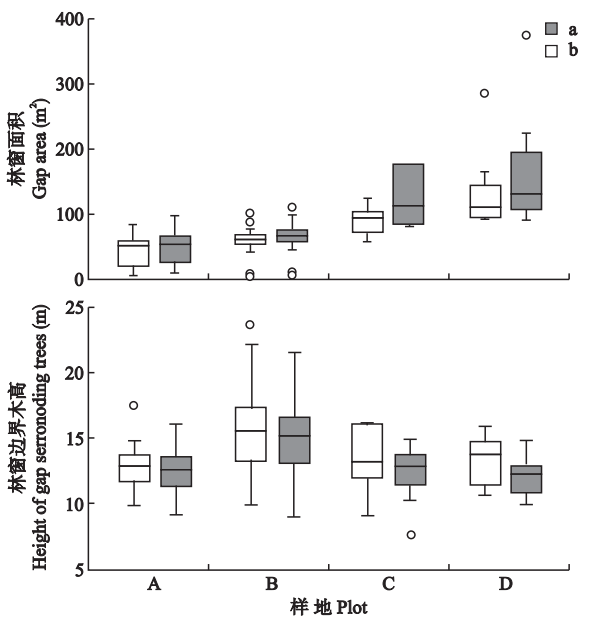


图 3　LiDAR(a)与野外观测(b)的林窗面积和边界木高
Fig.3　LiDAR (a) and field (b) survey gap area and canopy height.

表 5 LiDAR 与野外观测林窗面积和边界木高的配对 *T* 检验和回归分析结果
Table 5 LiDAR-field survey gap area, canopy height paired samples *T* test and regression

	样地 Plot	LiDAR 与野外观测的配对 *T* 检验 LiDAR-field survey paired samples *T* test				回归方程 Regression equation	相关系数 R^2
		Sig.	*P*	配对差异均值±标准差 Difference mean±standard deviation	差异百分比 Difference percent (%)		
林窗面积	A	0.789	0.001	9.16±1.61	+17.01	$y=1.142x+2.902$	0.947
Gaps area	B	0.821	0.001	5.74±1.26	+8.83	$y=1.097x-0.071$	0.967
(m^2)	C	0.641	0.002	24.02±5.46	+20.79	$y=1.121x+12.975$	0.651
	D	0.899	0.023	31.35±8.81	+18.79	$y=1.425x-26.199$	0.981
	平均 Mean	0.082	0.001	19.97±2.30	+19.92	$y=1.288x-6.577$	0.962
边界木高	A	0.384	0.179	−0.92±0.15	−7.4	$y=0.918x+0.632$	0.883
Canopy height	B	0.827	0.431	−1.15±0.18	−7.6	$y=0.941x+0.312$	0.955
(m)	C	0.795	0.121	−1.34±0.37	−10.9	$y=0.757x+2.200$	0.783
	D	0.758	0.113	−1.81±0.37	−15.1	$y=0.694x+2.845$	0.728
	平均 Mean	0.528	0.146	−1.31±0.12	−9.9	$y=0.916x+0.468$	0.878

Sig.: 配对差值正态分布显著性 Paired samples difference normal distribution significance; *P*: 配对 *T* 检验双侧显著性 Paired samples *T* test bilateral significance; *y*: LiDAR 估测 LiDAR estimation; *x*: 野外观测 Field survey.

显著性都大于 0.05,说明利用配对 *T* 检验法具有统计学意义.配对 *T* 检验的原假设是面积差值的分布符合平均值为 0 的 *t* 分布,双侧显著性 *P* 都小于 0.05,说明 LiDAR 与野外观测的林窗面积有显著差异.总体而言,LiDAR 估测的林窗面积平均比野外观测值高 19.9%,其中,C 样地的差异最大,为 20.8%,B 样地的差异最小,为 8.8%.分别以 LiDAR 和野外观测的林窗面积为因变量和自变量进行线性回归分析,得到的相关系数(R^2)为 0.962,说明两者具有强线性相关性,回归方程的斜率大于 1,说明 LiDAR 估测的林窗面积通常大于野外观测.

依据相关研究结果,选择林窗边界木点云百分位高度 H_{90} 反演林窗边界木高[28-29].对比不同样地的 LiDAR 和野外观测林窗边界木高的中位数(图 3),说明 LiDAR 估测的林窗边界木高度通常比野外观测值低,但总体差别不明显.

用配对 *T* 检验法比较 LiDAR 估测与野外观测林窗边界木高的差异(表 5).两者配对的高度差值正态分布显著性大于 0.05,说明利用配对 *T* 检验法具有统计学意义,配对 *T* 检验双侧显著性为 0.146 (>0.05),维持原检验假设,即两者测量的林窗边界木高没有显著差异.总体而言,LiDAR 估测比野外观测的低 9.9%.回归模型的 R^2 值为 0.878,说明两者具有较强的线性相关性,回归方程的斜率接近于 1 且常数项很小,也说明两者测量的边界木高相差无几.

2.4 区域内林窗基本特征

利用 LiDAR 数据在 1.8 km^2 的森林调查区域中共识别出 2299 个林窗,林窗密度为 12.8 个 · hm^{-2}.林窗面积在 4.03~747.36 m^2,均值为 85.06 m^2,总面积 238860 m^2,占森林调查区域的 13.3%.林窗面积集中分布在 57.69~106.25 m^2,其中,57.69~72.63 m^2 所占数量比例最大,72.63~106.26 m^2 次之(表 6).林窗面积特征分布的偏度为 2.513,说明其具有正偏离性,即多为较小面积的林窗.

林窗边界木高与森林类型和群落的发育程度有关,调查区域内林窗边界木高基本处于 9.38~20.12 m,平均高 15.33 m,最高 22.64 m,最小 7.81 m(表 6),与该区植被 10~25 m 的平均高度相吻合.林窗边界木高的特征分布偏度为 1.104,说明其接近正态分布,即不同边界木高的数量比例分布比较均衡.

区域内林窗形状指数(S_i)的均值为 1.71,最大 3.85,最小 1.07,集中分布在 1.32~2.03(表 6),S_i 分布的偏度为 2.217,说明其具有正偏离性,即多为较小形状指数、边缘效应不太显著的林窗.

表 6 林窗基本特征
Table 6 Gaps basic characteristics

林窗特征 Gaps characteristic	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	中位数 Median	下四分位数 Q25	上四分位数 Q75	偏度 Skewness
面积 Area (m^2)	85.06	747.36	4.03	72.63	57.69	106.25	2.513
边界木高 Canopy height (m)	15.33	22.64	7.81	14.89	9.38	20.12	1.104
形状指数 Shape index	1.71	3.85	1.07	1.49	1.32	2.03	2.217

3 讨　论

林窗是森林生态系统中最普遍、最重要的小尺度干扰，是森林生态系统更新演替的驱动要素.林窗研究的基础是准确测量林窗面积、林窗边界木高度和林窗形状等几何特征.有关林窗几何特征的研究很多[4,31]，但传统手工测量方法有其局限性：1）大范围样方数据采集难以在短时间内完成，且需要耗费大量人力、物力；2）受人工操作、自然条件等因素的影响，整体结果往往并不完全客观、稳定[31].近年来，LiDAR 技术在诸如森林生物量反演、数字高程模型的建立以及森林结构参数的提取等方面已经取得了实质性进展，将 LiDAR 推广到森林干扰生态学领域，为林窗研究提供更多应用支撑具有重要意义.

本研究表明，机载 LiDAR 能实现跨尺度林窗数量、面积、边界木高度和形状等特征的准确、高效监测.选择何种内插方法、插值生成数据的分辨率大小，都会影响地物表面模型的有效性和稳定性[15].以覆盖 1 个以上点云的格网数占总格网的比例为依据选择 DEM 和 CHM 的栅格分辨率.在给定地形起伏度和点云密度情况下，分别选择反距离权重法（IDW）和普通克里格法（OK）对植被点云和地面点云进行高精度内插.本研究结果将有助于其他研究者在给定栅格分辨率、点云密度和地形起伏程度等条件下，利用 LiDAR 数据生成 DEM 和 CHM 时选择合适的内插方法.

基于 LiDAR 的林窗识别率为 94.8%（表 3），主要影响因素是林窗面积和林窗形成木类型（表 4）.由于 LiDAR 数据的高分辨率，对大面积林窗的识别很可靠；但在小面积林窗中，枯立和折枝情况可能会使林窗内植被点云密度有所增加，造成 CHM 中林窗剖面与相邻树冠高度差达不到 5 m 阈值，抑或造成 GPL 中多边形面积进一步减少，达不到 4 m^2 阈值，最终导致对小面积林窗的错判.而有效加入植被光谱信息或改进冠层边缘提取方法或能解决这一问题.

等角椭圆扇形 8 分法（IES8）是一种操作性强、性能较稳定的林窗面积野外观测方法.根据朱教君等[4]的研究结果，林窗面积的真实值应该比 IES8 测出的大 18.7%～26.2%，而 LiDAR 估测的林窗面积平均比 IES8 高 19.9%左右（表 5），说明 LiDAR 获取的林窗面积更接近真实值.山谷样地的林窗形状大都是较规则的近似椭圆形，LiDAR 与 IES8 只有 8.8%的差异，而山脊和山顶样地的林窗形状大都不规则，两者差异达 20.8%，说明在量算大面积、不规则林窗时 LiDAR 比 IES8 准确、可靠.

研究区域内林窗面积多在 57.69～106.25 m^2，其中，57.69～72.63 m^2 所占数量比例最大，林窗密度为 12.77 个 · hm^{-2}，这与其他中亚热带常绿阔叶林相[6-7]基本一致.林窗形成方式多以冰雪造成的机械性折干或折枝，其通常没有温带红松林掘根风倒形成的林窗面积大.部分地段的森林历史上曾进行过择伐，具有一定的次生性.这也是区域内林窗面积和林窗形状指数偏小的原因.

LiDAR 获取的林窗边界木高度比野外观测的平均低 9.9%（表 5），在地形陡峭的山脊或山顶部分的林窗边界木高度估测误差为 15.1%左右，缓坡处的边界木高度误差只有 7%左右.这与刘清旺等[29]研究的 LiDAR 单木树高估测精度相似.究其原因：一是由于 LiDAR 点云是离散形式的，真正反映边界木树冠顶部数据较少，大都是树冠稍低部位的信息；二是由于地形对树高估测精度有影响[28].因此，应适当扩大机载 LiDAR 航带间重叠区域，增加点云的密度，尽量选择扫描角度小的 LiDAR 数据，减少高程测量误差，削弱地形的影响.

综上所述，机载 LiDAR 具备高采集速度和大范围获取冠层三维结构特征的能力，是高效描述林窗特征的有效工具.LiDAR 有很高的林窗识别率，可较高精度地估测林窗面积、边界木高和形状等林窗几何特征.区域内林窗面积多在 57.69～106.25 m^2，边界木高多在 9.38～20.12 m，形状指数多在 1.32～2.03，说明区域内多为较小面积、边缘效应不太显著的林窗.林窗研究周期长，开展连续和深入的研究尤为重要.利用包括机载 LiDAR 在内的多源遥感数据开展林窗动态研究，揭示其与森林结构、物种组成和生物多样性之间的关系，将是下一步的工作目标.

参考文献

[1] Fei S-M（费世民），He Y-P（何亚平），He F（何飞），*et al*. Review and prospects on some questions of forest gaps. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*（四川林业科技），2009，**30**（4）：28-37（in Chinese）

[2] Zang R-G（臧润国），Liu J-Y（刘静艳），Dong D-F（董大方）. Gap Dynamics and Forest Biodiversity. Beijing：China Forestry Press，1999（in Chinese）

[3] Zhu J-J（朱教君），Liu Z-G（刘足根）. A review on disturbance ecology of forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报），2004，**15**（10）：1703-1710（in Chinese）

[4] Zhu J-J（朱教君），Liu S-S（刘世荣）. Studies on Disturbance Ecology of Forest. Beijing：Chinese Forestry

Press, 2007(in Chinese)
[5] Zhao X-H (赵秀海), Zhang C-Y (张春雨), Zheng J-M (郑景明). Correlation between gap structure and tree diversity of mixed-broad-leaved Korean pine forests in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2236-2240 (in Chinese)
[6] Shen Z-H (沈泽昊), Li D-X (李道兴), Wang G-F (王功芳). Studies on the gap disturbance of the mountain mixed forests of evergreen and deciduous broad-leaved species at MT. Dabaoling in the Three Gorges. I. The essential characteristics of the gaps. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(3): 276-282 (in Chinese)
[7] Yan S-J (闫淑君), Hong W (洪 伟), Wu Z-C (吴承祯), *et al*. Gaps and their natural disturbance characteristics in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(7): 1126-1130 (in Chinese)
[8] Wu N (吴 宁). Dynamics of forest gaps in subalpine coniferous forests on the eastern slope of Gongga Mountain. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 1999, **23**(3): 228-237 (in Chinese)
[9] Cui N-J (崔宁洁), Zhang D-J (张丹桔), Liu Y (刘洋), *et al*. Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps of varying sizes in *Pinus massoniana* plantations. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2014, **38**(5): 477-490 (in Chinese)
[10] Tanaka H, Nakashizuka T. Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest. *Journal of Ecology*, 1997, **58**: 835-841
[11] Torimaru T, Itaya A, Yamamoto SI. Quantification of repeated gap formation events and their spatial patterns in three types of old-growth forests: Analysis of long-term canopy dynamics using aerial photographs and digital surface models. *Forest Ecology and Management*, 2012, **284**: 1-11
[12] D'Aoust V, Kneeshaw D, Bergeron Y. Characterization of canopy openness before and after a spruce budworm outbreak in the southern boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, **34**: 339-353
[13] Peng S-L (彭少麟), Guo Z-H (郭志华), Wang B-S (王伯荪). Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(6): 903-909 (in Chinese)
[14] Zhu JJ, Lu DL, Zhang WD. Effects of gaps on regeneration of woody plants: A meta-analysis. *Journal of Forestry Research*, 2014, **25**: 501-510
[15] Guo Q-H (郭庆华), Liu J (刘 瑾), Tao S-L (陶胜利), *et al*. Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2014, **59**: 459-478 (in Chinese)
[16] Yu X, Hyypae J, Kaartinen H, *et al*. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 451-462
[17] Zhang KQ. Identification of gaps in mangrove forests with air borne LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 2309 ~2325
[18] Latypov D. Estimating relative lidar accuracy information from overlapping flight lines. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, **56**: 236-245
[19] Hodgson ME, Bresnahan P. Accuracy of airborne lidar derived elevation: Empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, **70**: 331-339
[20] Guo Q, Li W, Yu H, *et al*. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, **76**: 701-712
[21] Liu XY. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 2008, **32**: 31-49
[22] Smith SL, Holland DA, Longley PA. Quantifying interpolation errors in urban airborne laser scanning models. *Geographical Analysis*, 2005, **37**: 200-224
[23] Vepakomma U, St-Onge B, Kneeshaw D. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 2326-2340
[24] Blackburn GA, Abd Latif Z, Boyd DS. Forest disturbance and regeneration: A mosaic of discrete gap dynamics and open matrix regimes? *Journal of Vegetation Science*, 2014, **25**: 1341-1354
[25] Popescu SC, Wynne RH. Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, **70**: 589-604
[26] Reitberger J, Schnorr Cl, Krzystrek P, *et al*. 3D segmentaion of individual tree exploiting full waveform lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, **4**: 1-14
[27] Qi H (齐 华). The optimization and improvement for the algorithm steps on the automatic creation of topology relation of polygons. *Acta Ggodaetica et Cartographica Sinica* (测绘学报), 1997, **26**(3): 254-260 (in Chinese)
[28] Liu F (刘 峰), Tan C (谭 畅), Lei P-F (雷丕锋). Estimating individual tree aboveground biomass of the mid-subtropical forest using airborne LiDAR technology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(11): 3229-3236 (in Chinese)
[29] Liu Q-W (刘清旺), Li Z-Y (李增元), Chen E-X (陈尔学), *et al*. Extracting height and crown of individual tree using airborne LIDAR data. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **30**(6): 83-89 (in Chinese)
[30] 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
[31] Hu L-L (胡理乐), Li J-S (李俊生), Wu X-P (吴晓莆), *et al*. Review on methods of measuring geometric characteristics of forest gaps involving gap size, gap shape, and the height of canopy trees surrounding the gap. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(7): 1911-1919 (in Chinese)

作者简介 刘 峰,男,1975 年生,博士,副教授.主要从事林业遥感和地理信息系统研究. E-mail: liufeng0808@ 126.com

责任编辑 杨 弘