

基于 LiDAR 的亚热带次生林林窗对幼树更新影响分析

刘峰 谭畅 王红 龙江平

(中南林业科技大学理学院, 长沙 410004)

摘要: 以湖南亚热带次生林为研究对象,利用多时相机载激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)和野外调查数据对林窗及幼树进行监测,分析比较林窗对幼树密度分布和树高生长变化的影响。结果表明,林窗大小和位置对幼树密度分布都有显著影响,喜光树种幼树主要集中在小林窗的中心区或大林窗的过渡区,在大林窗中密度最大(647株/hm²),耐荫树种幼树主要集中在林窗的边缘区,在中等林窗中密度最大(941株/hm²)。林窗大小对幼树树高生长有显著影响,喜光树种和耐荫树种幼树分别在大林窗和中等林窗中树高生长量最大(69.3 cm/a、57.7 cm/a),喜光树种幼树在中心区的树高生长量明显大于其他位置,耐荫树种幼树的树高生长量在位置上的差异不显著。线性混合模型分析显示林窗大小是促进幼树树高生长的最主要因素,幼树树高生长变化在不同林窗中呈聚集性。从幼树密度树高生长情况来看,50~150 m²林窗较适合促进亚热带次生林的群落演替。

关键词: 林窗; 激光雷达; 幼树; 密度; 树高生长

中图分类号: S718.5; TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0198-07

Effect of Canopy Gap on Subtropical Secondary Forest Sapling Regeneration Based on LiDAR

LIU Feng TAN Chang WANG Hong LONG Jiangping

(College of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Canopy gaps are small-scale openings in forest canopies which offer suitable micro-climatic conditions for tree regeneration. The subtropical secondary forest in Hunan Province was focused, and multi-temporal light detection and ranging (LiDAR) and survey data were adopted to analyze effects of different canopy gaps on sapling density and height growth. The results showed that both size of gap and position within gap significantly affected sapling density distribution. Shade intolerant sapling was mainly distributed in central zones of small-sized gap and transition zones of large-sized gap, in which the density got the maximum (647 trees/hm²). Shade tolerant sapling was usually appeared in edge zones of gaps, and the maximum density (941 trees/hm²) was occurred in medium-sized gap. The size of gap significantly affected sapling height growth, shade intolerant and shade tolerant sapling had the greatest growth rate of 69.3 cm/a and 57.7 cm/a in large-sized and medium-sized gaps, respectively. Height growth of shade intolerant sapling in central zones was significantly higher than those in other zones, while shade tolerant sapling height growth was irrespective of their position within the gap. Results of mixed linear model suggested that size of gap had the main effect on sapling height growth, which exhibited aggregation among different levels of gaps. The higher density and more rapid height growth rate were got in the gap with size of 50~150 m², which could be the optimal gap size for facilitating community succession of subtropical secondary forest.

Key words: canopy gap; LiDAR; sapling; density; height growth

引言

林窗(Forest gap)指森林群落中主林层受人为

或自然干扰在林地上形成的不连续林中空隙地,是促进森林植被更新的重要空间^[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

收稿日期:2016-08-01 修回日期:2016-09-20

基金项目: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)和中南林业科技大学人才引进科研启动基金项目

作者简介:刘峰(1975—),男,副教授,博士,主要从事林业遥感与GIS研究,E-mail:liufeng0808@126.com

意义^[2]。WATT^[3]把林窗分为冠层林窗(Canopy gap)和扩展林窗(Expanded gap)两类,本文所指林窗为前者。迄今,国内外学者对林窗开展了广泛的应用研究,在林窗特征观测^[4-5]、林窗环境异质性^[6-7]、林窗对生物多样性的影响^[8-9]、林窗动态更新^[10-12]、林窗的生态系统经营管理^[13]等方面成果显著。

传统人工测量方法在样地尺度上能够得到最准确的林窗中幼树或幼苗更新信息,但需耗费大量人力、物力,且将调查结果外推至景观水平时往往并不可靠。激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)这种先进的遥感技术在森林生态系统监测和模拟等方面已有较广泛的应用^[14-16],但在林窗干扰及更新方面的研究则相对薄弱。将LiDAR技术应用到亚热带次生林群落演替方面,对解决林窗幼树更新的生态学问题,有着重要的理论和现实意义。本文选取湖南雪峰山南麓的马尾松次生林为研究对象,利用多时相LiDAR和野外调查数据对不同林窗中幼树密度和树高生长进行观测和比较分析,重点探讨影响喜光树种和耐荫树种幼树更新的林窗因子,旨在探索次生林更新的维持机制和规律。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省云山国家森林公园(26°25'~27°00'N、110°22'~113°3'E),地处祁邵丘陵区,海拔高度多在550~850 m之间,三面环山,南高北低。由于人为和自然干扰影响,原生常绿阔叶林大部分转变演替成针阔混交林。土壤自山麓而上依次为红壤、山地黄壤和黄棕壤,区内四季分明,雨水充沛,年平均气温16°C,年均降水量约1400 mm,山上相对湿度大,无霜期约250 d。马尾松次生林的乔木层以马尾松(*Pinus massoniana*)占优势,另有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、木荷(*Schima superba*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)等;灌木层主要有南方荚蒾(*Viburnum fordiae*)、山茶(*Camellia japonica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等;草本主要有蕨(*Pteridium aquilinum*)和芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。本文将马尾松和杉木归类为喜光树种,中生偏阴的木荷、麻栎和甜槠等归类为耐荫树种。

1.2 试验数据

LiDAR数据获取时间分别是2006年9月份和2011年6月份(表1),每束激光都包含第一回波和最后回波的坐标值、高度值、强度值等信息。LiDAR点云数据都采用LAS格式,投影方式为UTM,参考

椭球为WGS84。处理软件为Terrasolid。

表1 LiDAR数据特征描述

Tab.1 Specifications of two LiDAR instruments used for data acquisition

| 数据描述 | 2006年 | 2011年 |
|---------------------------|----------|----------|
| LiDAR系统 | ALTM2050 | LMS-Q560 |
| 飞行高度/m | 1000 | 800 |
| 光束散射角/mrad | 0.3 | 0.5 |
| 扫描角度/(°) | 15 | 22.5 |
| 脉冲频率/kHz | 50 | 200 |
| 光斑大小/cm | 25 | 50 |
| 点云密度/(点·m ⁻²) | 1~3 | 4~6 |

收集区内森林资源连续清查固定样地数据,根据遥感范围进行同期野外调查,沿着地形走势设置宽20 m、长100~400 m不等的调查样地,林下样地内设置10 m×10 m样方。采用等角椭圆扇形8分法^[2]实测林窗大小,对样地进行每木检尺:DGPS或全站仪测量林窗中心位置及林窗范围内立木位置,伸缩式测高器测量树高(H)。结合沈国舫等^[17]的观点和样地情况,将 $1\text{ m} \leq H \leq 5\text{ m}$ 划分为幼树,在满足统计分析对样本例数适用条件的前提下,剔除特异样木后保留312株幼树,其中林窗中喜光树种和耐荫树种幼树分别为102、139株,林下幼树71株。

1.3 研究方法

1.3.1 LiDAR数据预处理

为减少不同航带间可能出现的高程相对偏移误差,采用航带重叠区误差校正方法,分别校正2006、2011年LiDAR高程精度,使各期航带间平均高程差值在-2~2 cm之间。利用Terrasolid软件分别对2期LiDAR数据进行影像与点云的配准,校正其水平精度,影像采用已正射化处理的0.5 m级分辨率的QuickBird全色波段遥感影像。

在林地范围内,选择适当的点云滤波、内插及栅格分辨率^[5],以提高冠层高度模型(Canopy height model, CHM)的有效性和稳定性。采用自适应TIN模型滤波方法(线性预测法的改进型)^[18]将原始LiDAR点云分类成地表点云和植被点云,利用普通克里格法(Ordinary Kriging, OK)和反距离权重法(Inverse distance weighted, IDW)进行高精度内插生成0.5 m分辨率的数字表面模型(Digital surface model, DSM)与数字高程模型(Digital height model, DEM)。DSM与DEM的差值即为CHM。

1.3.2 幼树识别

首先,采用CHM数字图像处理 and QuickBird影像解译相结合方式,根据下列条件进行林窗识别:①在CHM勾勒出的多边形面积在4~1000 m²之间。

②多边形剖面与相邻树冠高度差在5 m以上。③多边形外缓冲区10 m以内为树冠^[5]。在CHM上根据林窗多边形计算林窗的面积、冠层高度和林窗形状指数。

其次,在CHM上采用标记控制分水岭算法进行幼树单木识别,根据样地内单木冠幅均值,选取半径为6像素(约3 m)的圆形卷积核进行局部非极大值抑制^[19]提取树冠层顶部作为标记。对于林窗内处于孤立木状态的幼树,该方法的识别效果较好。对于冠层叠置、植株密度较大的林窗边缘幼树,采用基于对象的点云分割算法进行识别^[16]。在此基础上,利用eCognition软件在遥感影像上进行喜光树种和耐荫树种分类,并记录幼树空间位置。树冠中心位置难以测量,本文以幼树主干的实测位置验证LiDAR观测幼树位置,验证条件是实测位置与单木LiDAR点云垂直投影中心位置之间的直线距离小于1 m。

1.3.3 幼树树高生长

在调查期间内,由于幼树可能倒伏或被旁边大树树冠遮盖等造成观测对象不一致,故试验以2006年LiDAR识别出的幼树为基础,与2011年对应的单木进行树高差值运算,即为5 a内幼树累积树高生长量。受茂密冠层或次生灌木的影响,地面LiDAR点云可能减少,同时由于落在幼树冠层顶部的LiDAR点云较少,若从CHM上提取树高或从LiDAR点云直接计算幼树高都会造成较严重的低估^[20]。为提高树高的估测精度,试验一方面综合2期LiDAR数据,加强地表点云密度,提高地表高程精度;另一方面借鉴分位数法^[21]的思路,对幼树的LiDAR点云按高度 H_{tree} 排序,将其上四分位值 $H_{tree_percent75}$ 与野外实测树高 H 建立回归方程

$$H_{11} = \alpha_{11} H_{tree11_percent75} + \beta_{11} \quad (1)$$

$$H_{06} = \alpha_{06} H_{tree06_percent75} + \beta_{06} \quad (2)$$

式中 H_{11} 、 H_{06} ——2011、2006年幼树高度
 $H_{tree11_percent75}$ ——2011年幼树高度上四分位值
 $H_{tree06_percent75}$ ——2006年幼树高度上四分位值
 α_{11} 、 α_{06} 、 β_{11} 、 β_{06} ——模型系数

来计算每株幼树在2006—2011年间树高累积生长量 $H_{11} - H_{06}$ 。

1.3.4 数据统计与分析

综合前人的研究^[2,10,12]和样地林窗特征,将林窗大小分为4个水平:小林窗I(5~50 m²)、中等林窗II(50~150 m²)、较大林窗III(150~300 m²)、大林窗IV(300~500 m²)。林窗内位置分为3个水平:林窗中心区(A)、过渡区(B)和边缘区(C)。

采用SPSS软件进行数据统计,双因素方差分析

(Two-way ANOVA)检验林窗大小和位置及其交互作用对幼树密度分布和树高生长的影响。若双因素交互作用显著,则对单因素进行简单主效应(Simple main effects)分析;若交互作用不显著,则进行单因素的多重比较(Least significant difference, LSD)分析,检验不同水平因素作用下幼树更新的差异显著性。

由于生境不同,林窗内幼树个体的更新也非完全独立,采用线性混合模型(Linear mixed model)验证不同林窗中幼树树高生长变化的聚集性,量化分析林窗大小、位置、次生灌木层高度以及2006年幼树高等因素对5 a内幼树累积树高生长变化的影响程度。线性混合模型拟合时将林窗与对应的幼树组成层次嵌套关系,对幼树树高进行标准正态化处理。

2 结果与分析

2.1 林窗与幼树LiDAR观测

区域内2011、2006年林窗密度分别为12.76、12.13个/hm²(表2),林窗大小直方图相似,都呈负指数分布(图1a),均值分别为97.5 m²和86.2 m²,都以小林窗为主,其中小于150 m²的林窗个数约占总数的64%。2011年林区冠层高度的均值以及上、下四分位数分别比2006年增加了约6%、9%和12%(图1b),反映出了主林层和幼树高度更新情况。

表2 2006年和2011年林窗特征统计

Tab.2 Descriptive statistics for canopy gaps in 2006 and 2011

| 特征参数 | 2006年 | 2011年 |
|----------------------------|-----------|-----------|
| 林窗个数 | 2 184 | 2 296 |
| 林窗总面积/m ² | 215 103.6 | 238 864.3 |
| 林窗密度/(个·hm ⁻²) | 12.13 | 12.76 |
| 平均冠层高度/m | 10.6 | 11.2 |
| 最小冠层高度/m | 1.3 | 1.4 |
| 最大冠层高度/m | 24.5 | 25.3 |
| 平均林窗面积/m ² | 97.5 | 86.2 |
| 最小林窗面积/m ² | 5.0 | 4.1 |
| 最大林窗面积/m ² | 1 003.4 | 892.2 |

以野外调查为基础验证LiDAR单木识别精度,林窗范围内单木识别率为81.7%(表3),明显高于林下识别率,且林窗内的识别率高于林窗边缘的识别率。林窗幼树树高LiDAR估测结果与野外调查结果呈线性相关, R^2 分别为0.84(均方根误差RMSE为1.19 m)和0.86(RMSE为1.17 m)。耐荫树种的树高拟合度 R^2 大于喜光树种,林窗内的树高拟合度 R^2 大于林窗边缘和林下。

林窗大小对不同树种的幼树密度有显著影响

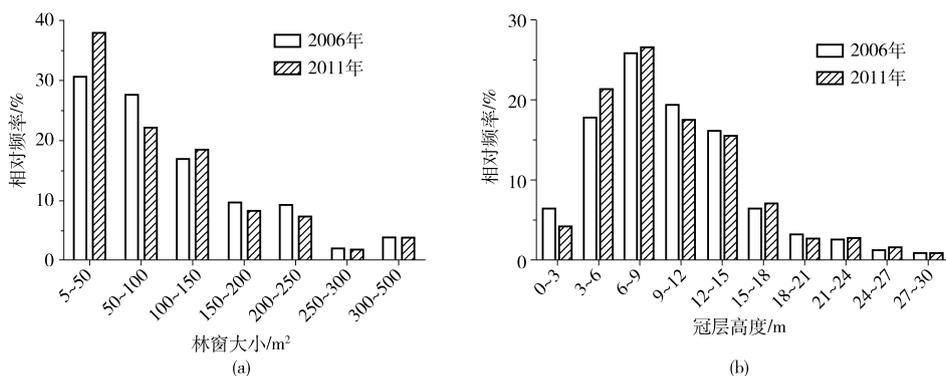


图1 林窗大小和冠层高度直方图

Fig. 1 Distribution histograms of canopy gap size and canopy height

表3 LiDAR 单木识别与树高估测精度

Tab. 3 Single tree recognition and tree height estimation by using LiDAR

| 幼树树种 | 位置 | LiDAR 单木识别 | | | 2006 年树高估测精度 | | 2011 年树高估测精度 | |
|------|------|------------|------|-------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | 实测/株 | 识别/株 | 识别率/% | R^2 | RMSE/m | R^2 | RMSE/m |
| 喜光树种 | 林窗内 | 57 | 50 | 87.7 | 0.83 | 1.19 | 0.83 | 1.11 |
| | 林窗边缘 | 45 | 33 | 73.3 | 0.81 | 1.28 | 0.82 | 1.23 |
| 耐荫树种 | 林窗内 | 49 | 43 | 87.8 | 0.89 | 0.98 | 0.88 | 0.99 |
| | 林窗边缘 | 90 | 71 | 78.9 | 0.82 | 1.12 | 0.84 | 1.07 |
| 总体 | 林窗范围 | 241 | 197 | 81.7 | 0.84 | 1.19 | 0.86 | 1.17 |
| | 林下 | 71 | 46 | 64.8 | 0.69 | 1.49 | 0.69 | 1.49 |

(表4、图2a, 图中V表示林下, 下同), 林窗内幼树密度明显大于林下(喜光树种 $p = 0.041$, 耐荫树种 $p = 0.046$, 图2a)。耐荫树种的密度总体大于喜光树种($p < 0.05$, 图2a)。随着林窗面积的增加, 单位面积内的喜光树种幼树数量逐渐增加, 在大林窗中最大(647 ± 33) 株/ hm^2); 耐荫树种幼树密度则在中等林窗中最大(941 ± 42) 株/ hm^2)。不同树种的幼树密度在较大林窗中都有明显降低。

表4 林窗对不同树种幼树密度和树高生长影响的双因素方差分析

Tab. 4 p -values from two-way ANOVA model analysis for saplings density, height by species class of saplings

| 幼树树种 | 效应 | 密度 p 值 | 树高生长量 p 值 |
|------|---------------------|----------|-------------|
| 喜光树种 | 林窗大小 | 0.032 * | 0.008 * |
| | 林窗内位置 | 0.028 * | 0.017 * |
| | 林窗大小 \times 林窗内位置 | 0.038 * | 0.035 * |
| 耐荫树种 | 林窗大小 | 0.039 * | 0.041 * |
| | 林窗内位置 | 0.212 | 0.596 |
| | 林窗大小 \times 林窗内位置 | 0.043 * | 0.105 |

注: * 显著性达 $p < 0.05$ 水平, 下同。

林窗内位置对喜光树种幼树密度有显著影响, 对耐荫树种的影响则不显著(表4、图2b)。在I、II林窗中喜光树种主要集中在林窗中心区, 在III、IV林窗中过渡区和边缘区的幼树比例大幅增加。耐荫树种主要集中在林窗边缘区, 其次是过渡区, 而中心区的密度很小, 该规律随林窗面积的增大愈发明显。

2.2 林窗对幼树密度影响

林窗大小和位置交叉作用对不同树种幼树的密度都有显著影响(表4)。简单主效应验证显示, 喜光树种密度在I、II、IV林窗的不同位置上存在显著差异($p = 0.033$ 、 $p = 0.006$ 、 $p = 0.039$), 主要集中在小林窗的中心区及大林窗的过渡区。耐荫树种密度在II、III、IV林窗的不同位置存在显著差异($p = 0.030$ 、 $p = 0.027$ 、 $p = 0.041$), 边缘区明显高于中心区和过渡区, 在I林窗中这种差异不明显(图3a)。

2.3 林窗对幼树树高生长的影响

林窗大小对不同树种幼树在2006—2011年间的累积树高生长量有显著影响(表4), 林窗幼树树高生长量明显大于林下(喜光树种 $p = 0.018$, 耐荫树种 $p = 0.026$), 喜光树种长势明显好于耐荫树种($p = 0.003$, 图4a)。随着林窗面积增加, 喜光树种累积树高生长量逐渐增加, 在IV林窗中最大(346.52 ± 43.24) cm, 平均每年增长69.3 cm, 明显大于I、II、III林窗($p = 0.011$ 、 $p = 0.020$ 、 $p = 0.022$); 耐荫树种累积树高生长量呈单峰状, 在II林窗中最大(288.56 ± 36.38) cm, 平均每年增长57.7 cm, 与I、III、IV林窗的差异显著性也有所降低($p = 0.034$ 、 $p = 0.048$ 、 $p = 0.041$)。

林窗内位置对喜光树种的树高生长量有显著影响, 对耐荫树种的影响却不显著(表3), 喜光树种在林窗中心区的树高生长量明显大于过渡区和边缘区

($p = 0.025, p = 0.032$),耐荫树种的树高生长量在中心区、过渡区、边缘区的差异不明显(图4b)。

林窗大小和位置交叉作用对幼树树高生长量影响不显著(表4)。LSD分析显示,喜光树种树高生

长量在II林窗的不同位置存在显著差异($p = 0.028$),中心区的树高生长量明显大于其他位置,在I、III、IV林窗中这种差异不明显。耐荫树种树高生长量在林窗中不同位置上差异不明显(图3b)。

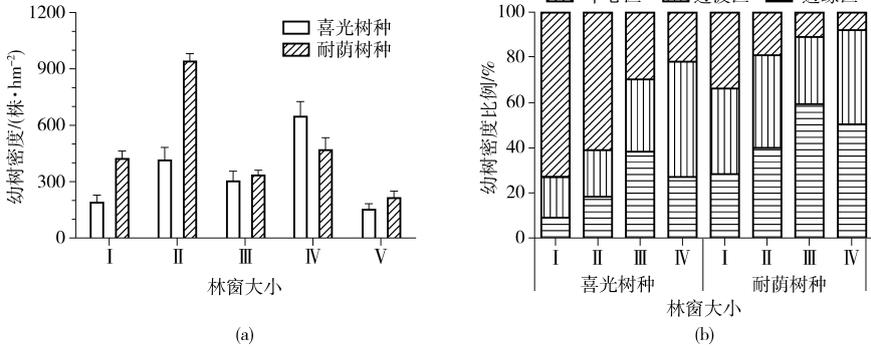


图2 2006年林窗内幼树密度分布

Fig.2 Saplings density distributions in 2006

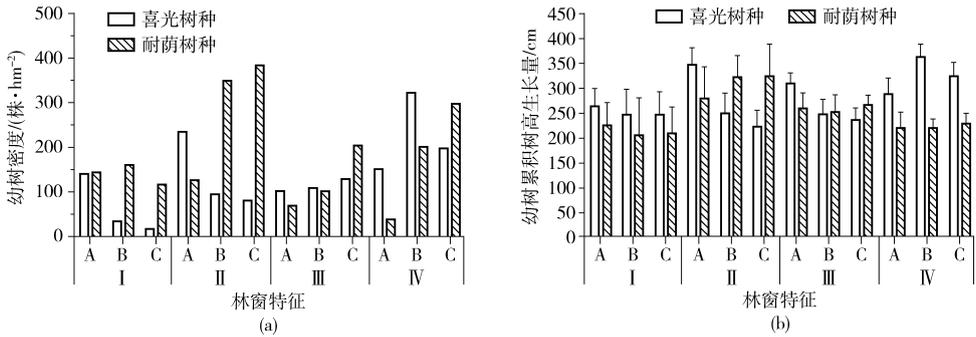


图3 林窗大小和位置双因素交叉作用下幼树密度分布和幼树累积树高生长量

Fig.3 Saplings regeneration affected by gap size and within-gap position

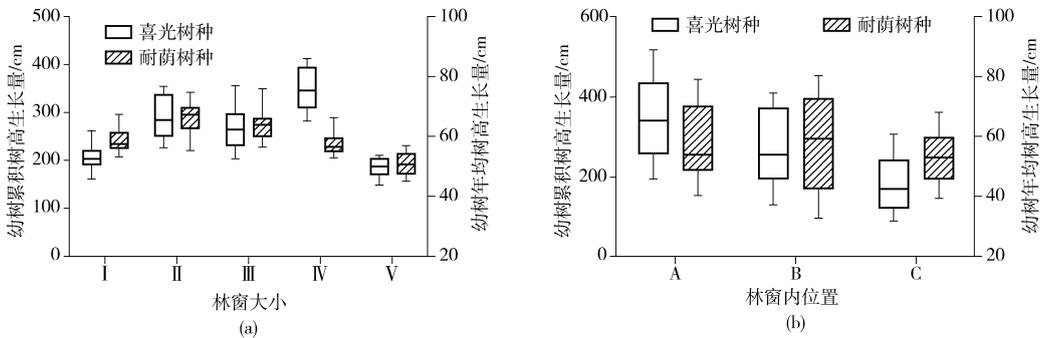


图4 2006—2011年幼树树高生长量

Fig.4 Saplings cumulative height growth between 2006 and 2011

利用线性混合模型分析林窗各因素对幼树5a内累积高生长的影响,以AIC准则(Akaike's information criterion)最小值对应模型为合理有效的模型。固定效应估计值和检验结果显示(表5),对因变量幼树树高生长有正面影响且作用排序为林窗大小、2006年幼树高、林窗大小与位置的交叉作用、位置等自变量,而灌木高度对幼树高生长则起抑制作用。以耐荫树种为参照水平,可见喜光树种的树高生长量较大,平均高出0.251倍。

随机效应的截距具有统计学意义,说明幼树树

高生长的变化程度在林窗水平上存在聚集性,即在适合更新的林窗中幼树树高生长整体好于其他林窗。残差具有统计学意义,说明在相同林窗环境下幼树树高生长存在个体差异。2006年幼树高的随机效应显著性说明,对于不同初始水平的幼树,经过5a的生长其树高变化的程度也可能不同。树种的不同对幼树树高生长量的变异也有影响。截距、残差、2006年幼树高及树种等4个参数的作用程度占整个随机效应方差的59.1%、35.8%、4.0%、1.1%。

表5 幼树树高生长的线性混合模型分析

Tab.5 Linear mixed model analysis for saplings height growth

| 模型参数 | 固定效应 | | 随机效应 | | |
|-------------|--------|----------------|--------------|-------|----------|
| | 系数 | R ² | 模型参数 | 系数 | p 值 |
| 截距 | 0.324 | 0.504 | 截距 | 0.104 | 0.003 * |
| 林窗大小 | 1.046 | | 残差 | 0.063 | <0.001 * |
| 林窗内位置 | 0.035 | | 2006 年幼树树高/m | 0.007 | 0.039 * |
| 林窗大小 × 位置 | 0.244 | | 树种 | 0.002 | 0.005 * |
| 灌层高度 | -0.105 | | | | |
| 2006 年幼树树高 | 0.635 | | | | |
| [树种 = 喜光树种] | 0.251 | | | | |
| [树种 = 耐荫树种] | 0 | | | | |

3 讨论

3.1 幼树识别与树高估测

利用 LiDAR 和高分辨率遥感影像识别林窗中幼树并估测其树高, 总体识别率达 81.7% (表 2), 略低于人工针叶林, 但明显高于针阔混交林。原因有两方面: ①幼树型态较小, 能反映幼树的点云和像素都比成树少, 而且如木荷等萌蘖较强的树种, 其幼树常为丛生状, 空间分布没有人工针叶林规则, 容易造成点云或像素的混淆, 产生较多的误判。②在未填充完毕的林窗中, 幼树较突出, 冠层结构较单一且少叠置, 从这点来说, LiDAR 结合栅格影像的幼树识别效果比单一数据源要好^[22-25]。对于较低密度的幼树点云数据, 使用分位数法可以较好估测树高, 这与刘清旺等^[26]的观点相似, 2006、2011 年幼树高 LiDAR 估测与当年野外调查结果都呈较强线性相关性。

3.2 林窗对幼树更新的影响

林窗为不同生物学特性的树种更新提供了条件, 所以林窗中幼树更新状况通常好于林下。中等林窗有利于耐荫树种的更新, 大林窗则更适合喜光树种的更新(图 2a)。

就密度而言, 喜光树种幼树主要集中在小林窗的中心区或大林窗的过渡区, 耐荫树种幼树主要集中在林窗的边缘区。对树高生长的作用程度而言, 林窗大小是关键影响因素(表 5), 幼树初始高度也有贡献, 灌层高度则起负作用, 较大林窗内草灌木迅速繁殖, 致使光照强度较长时间处于幼树生长所需

的阈值以下, 反而抑制了幼树树高生长。

总之, 林窗的形成改变了环境资源的有效性及其分布格局, 从而影响到植被的生态型和生态位, 因此, 在分析林窗对幼树更新影响时, 既要考虑树种的生物学特性, 又要考虑林窗内复杂环境因子的系统反应。林窗中幼树更新是个长期过程, 短期内不可能完成, 所以应该增大遥感的时间跨度和密度, 对幼树密度和树高生长进行连续性监测, 同时加强幼苗和灌草木的野外调查以及林窗环境因子的动态分析, 以期能更深入阐释林窗干扰与森林生态系统演替的关系, 探讨林窗中幼树更新的规律。

4 结论

(1) 利用 LiDAR 监测亚热带次生林林窗中的幼树更新情况是可行的, 为提高监测的准确性, 应确保多时相遥感数据精度都处于较高水平。

(2) 区域内的林窗以小面积为主, 林窗范围内幼树单木识别率为 81.7%, 幼树树高 LiDAR 估测与野外调查呈较强线性相关性。

(3) 林窗大小和林窗内位置对幼树密度影响显著, 喜光树种主要分布在小林窗的中心区及大林窗的过渡区, 耐荫树种主要分布在林窗的边缘区。

(4) 幼树树高生长变化在不同林窗中呈聚集性, 林窗大小是促进幼树树高生长的主要因素, 喜光树种的树高生长普遍快于耐荫树种, 50 ~ 150 m² 林窗较适合促进次生林向常绿阔叶林等顶级群落的进展演替。

参 考 文 献

- 臧润国, 刘静艳, 董大方. 林窗动态与森林生物多样性[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 3-9.
- 朱教君, 刘世荣. 森林生态干扰研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 166-168.
- WATT A S. Pattern and process in the plant communities[J]. Journal of Ecology, 1947, 35: 1-22.
- 胡理乐, 李俊生, 吴晓菁, 等. 林窗的几何特征测量方法评述: 林窗大小、林窗形状、林窗高度[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1911-1919.
- HU Lile, LI Junsheng, WU Xiaojing, 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1911-1919. (in Chinese)
- 刘峰, 谭畅, 王红, 等. 基于机载激光雷达的中亚热带常绿阔叶林林窗特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3611-3618.
- LIU Feng, TAN Chang, WANG Hong, et al. Characterization of mid-subtropical evergreen broad-leaved forest gap based on light

- detection and ranging (LiDAR)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3611–3618. (in Chinese)
- 6 区余端, 苏志尧. 粤北山地常绿阔叶自然干扰后冠层结构与林下光照动态[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5637–5645.
OU Yudian, SU Zhiyao. Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5637–5645. (in Chinese)
- 7 丁彦彦, 卢训令, 李昊民. 常绿阔叶林不同演替阶段群落天童国家森林公园光环境特征比较[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2862–2867.
DING Shengyan, LU Xunling, LI Haomin. A comparison of light environmental characteristics for evergreen broad-leaved forest communities from different successional stages in Tiantong National Forest Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2862–2867. (in Chinese)
- 8 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J]. 植物生态学报, 2014, 38(5): 477–490.
CUI Ningjie, ZHANG Danju, LIU Yang, et al. Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps of varying sizes in *Pinus massoniana* plantations[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2014, 38(5): 477–490. (in Chinese)
- 9 闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 等. 福建中亚热带常绿阔叶林林窗动态与生物多样性[J]. 林业科学, 2004, 40(6): 25–31.
YAN Shujun, HONG Wei, WU Chengzhen, et al. Gap phase regeneration in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin, Fujian[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(6): 25–31. (in Chinese)
- 10 刘庆. 林窗对长苞冷杉自然更新幼苗存活和生长的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 204–209.
LIU Qing. The effects of gap size and within gap position on the survival and growth of naturally regenerated *Abies georgei* seedlings[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 204–209. (in Chinese)
- 11 FORRESTER J, LORIMER C, DYER J, et al. Response of tree regeneration to experimental gap creation and deer herbivory in north temperate forests[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 329: 137–147.
- 12 JACOB D, JUSTIN L. Canopy gap dynamics and development patterns in secondary *Quercus* stands on the Cumberland Plateau, Alabama, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262: 2229–2239.
- 13 CHRISTEL C, ANTHONY W, TERRY F. Diversifying the composition and structure of managed, late-successional forests with harvest gaps: what is the optimal gap size? [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 304: 110–120.
- 14 GUO Q H, LIU J, TAO S L, et al. Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(6): 459–478.
- 15 VEPAKOMMA U, STONGE B, KNEESHAW D. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 2326–2340.
- 16 刘峰, 谭畅, 雷丕锋. 中亚热带森林单木地上生物量的机载激光雷达估测[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3229–3236.
LIU Feng, TAN Chang, LEI Pifeng. Estimating individual tree aboveground biomass of the mid-subtropical forest using airborne LiDAR technology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3229–3236. (in Chinese)
- 17 沈国舫, 翟明普. 林业造林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 101–122.
- 18 AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(Part B3): 85–92.
- 19 WANG L, GONG P, GREGORY S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(3): 351–357.
- 20 MATTI M, ERIK N, JARI V. Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies[J]. Managing Forest Ecosystems, 2014, 27: 419–435.
- 21 庞勇, 赵峰, 李增元, 等. 利用机载激光雷达技术进行森林高度反演[J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 152–158.
PANG Yong, ZHAO Feng, LI Zengyuan, et al. Forest height inversion using airborne lidar technology[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(1): 152–158. (in Chinese)
- 22 REITBERGER J, SCHNORR C, KRZYSZEK P, et al. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LiDAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64: 561–574.
- 23 GAULTON R, MALTHUS T. LiDAR mapping of canopy gaps in continuous cover forests: a comparison of canopy height model and point cloud based techniques[J]. Remote Sensing, 2010, 31: 1193–1211.
- 24 刘峰, 谭畅, 张贵, 等. 长白落叶松单木参数与生物量机载 LiDAR 估测[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 219–224, 242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130939&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.039.
LIU Feng, TAN Chang, ZHANG Gui, et al. Estimation of forest parameter and biomass for individual pine trees using airborne LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 219–224, 242. (in Chinese)
- 25 张卫正, 董寿银, 王国飞, 等. 基于机载 LiDAR 数据的林木冠层投影面积与体积测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 304–309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160141&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.041.
ZHANG Weizheng, DONG Shouyin, WANG Guofei, et al. Measurement of trees crown projection area and volume based on airborne LiDAR data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 304–309. (in Chinese)
- 26 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单个树的高度和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83–89.
LIU Qingwang, LI Zengyuan, CHEN Erxue, et al. Extracting height and crown of individual tree using airborne LiDAR data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6): 83–89. (in Chinese)