

文章编号:1001-8166(2009)07-0748-08

基于 LIDAR 数据的森林参数反演方法研究^{*}

何祺胜^{1,2,3}, 陈尔学³, 曹春香^{1*}, 刘清旺³, 庞勇³

(1. 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国林业科学研究院资源信息研究所,

林业遥感与信息技术重点开放性实验室, 北京 100091)

摘 要:森林结构参数诸如林分平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量等的空间分布对于森林可持续经营管理具有重要意义。以黑河流域祁连山大野口典型森林区为研究区, 采用高密度 LIDAR 小脚印点云数据, 在进行单木结构参数提取的基础上, 按 20 m × 20 m 大小的网格进行了小区域森林参数反演研究。首先由 LIDAR 点云数据生成冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM), 从 CHM 中估测单株木结构参数树的位置、树高、冠幅。然后采用多元逐步回归分析法建立样地(20 m × 20 m)尺度上 LIDAR 估测的平均树高、冠幅等与实测森林参数(林分平均高、林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量)之间的关系。结果表明, 林分平均高、林分算术平均高、地上生物量的估测方程精度较高, R^2 均大于 0.7, 平均冠幅、平均胸径、林分密度的估测方程 R^2 均大于 0.5, 根据建立的方程得到了森林参数的空间分布图。高密度 LIDAR 数据可以得到较高精度的森林参数空间分布图, 对于森林可持续经营管理以及林相图的更新等具有重要意义, 同时对小流域森林水文科学的研究具有重要的应用价值。

关 键 词: LIDAR; 森林参数反演; 黑河流域大野口

中图分类号: TP79; P463.22

文献标志码: A

1 引 言

森林是陆地上面积最大、分布最广、组成结构最复杂、物质资源最丰富的生态系统, 也是自然界功能最完善的资源库、生物基因库, 以及水、碳、养分及能源储存调节库, 对改善生态环境、维护生态平衡具有不可替代的作用。传统的森林参数测定需要外业实地测量, 仅能获得一些点上的数据, 不利于研究区域尺度或大范围的森林参数。遥感技术日益深入和成熟, 已经成功用于大区域森林制图、灾害监测等方面, 但定量获取森林高度、生物量等参数的工作直到合成孔径雷达和激光雷达技术的成熟才取得了突破

性进展^[1]。

近 20 年来, 国外已经就激光雷达在林业上的应用进行了大量成功的尝试, 成功反演了森林高度、冠层垂直结构、郁闭度、胸高断面积和蓄积量(或地上生物量)及单木参数的反演^[2~7]。其中在林木高度测量与林分垂直结构信息获取方面具有其它遥感技术无可比拟的优势。普通的光学传感器只能用于提供森林水平分布的信息而很难提供垂直分布的信息, 激光雷达遥感根据采样方式和配置不同(离散回波还是波形激光雷达), 可以高精度地提取森林水平和垂直结构参数信息^[8]。

虽然 LIDAR 反演森林参数在国外已有很多研

* 收稿日期:2008-12-30;修回日期:2009-06-11.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动协同反演理论与方法”(编号:2007CB714404);中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09)资助.

作者简介:何祺胜(1981-),男,山东定陶县人,博士研究生,主要从事森林定量遥感研究. E-mail:heqis111@gmail.com

* 通讯作者:曹春香(1964-),女,内蒙古呼和浩特人,研究员,主要从事森林遥感与公共卫生领域空间信息技术应用研究.

E-mail:cao413@irsa.ac.cn

究,但国内的相关研究较少,尤其对于森林生物量的研究尚未见报道。本文基于黑河联合遥感试验的成果^[9],选取黑河流域祁连山大野口森林区,采用高密度的 LIDAR 小脚印点云数据对 LIDAR 覆盖区的主要森林结构参数进行了反演研究,反演的森林参数空间分布图可以用于林相图的更新,对于森林可持续经营管理以及小流域森林水文科学的研究具有重要的应用价值。

2 研究区和数据

2.1 研究区概况

祁连山是我国西北地区著名的高大山系之一,位于青藏、黄土两大高原和蒙新荒漠的交汇处,属大陆性高寒半干旱气候,境内山势由西北走向东南,起伏延绵千余公里,相对高差悬殊。区内自然气候条件复杂、水热条件差异大,使植被的分布具有明显的水平差异和垂直梯度变化。位于海拔 2 300 ~ 3 800 m 的水源涵养林是祁连山最主要的植被分布区,跨祁连山 3 个植被气候带。祁连山水源涵养林具有涵养水源、保持水土、保护生物多样性等多种生态防护功能,是祁连山及河西走廊绿洲生态系统的主体。

本次研究选取的试验区位于甘肃省张掖市肃南裕固族自治县西水林场内,属于甘肃黑河流域祁连山水源涵养林,中心地理坐标约为 100° 15' E, 38° 32' N,海拔约为 2 700 ~ 3 200 m,主要树种为青海云杉(*Picea crassifolia*)天然纯林,属于成熟林,地表覆盖物主要为苔藓。

2.2 数据

LIDAR 数据获取时间为 2008 年 6 月 23 日,飞行区域为祁连山大野口森林水文试验区,采用的 LIDAR 系统为 LiteMapper 5600,其中激光扫描仪为 Riegl LMS-Q560,波长 1 550 nm,激光脉冲长度 3.5 ns,激光脉冲发散角小于等于 0.5 mrad。LIDAR 点云数据采用 WGS84 坐标系,UTM 投影北半球 6 度分带的第 47 带。LIDAR 点云数据平均点间隔为 0.54 m,表示成平均点密度 3.43 个/m²。

外业调查时间为 2008 年 6 月 1 ~ 13 日,布设一个 100 m × 100 m 的样地(以下称为超级样地)和沿飞行方向 1 km 长度上每隔 50 m 布设 20 m × 20 m 的 20 个样地(以下称为样带样地)。超级样地形状为正方形,北偏东约 25°,按照 25 m × 25 m 尺寸划分成 16 个子样地(图 1 左上角)。在每个子样地角点和中心点设立标桩,使用带有编号的铁牌对子样地内每株树进行标记。样地单株木结构参数的测量

内容包括胸径(高 1.3 m 处的直径)、树高、冠幅等,使用围尺测量胸径,使用激光测高仪(TruPulse 200)测量树高和枝下高,对于较矮的林木使用标杆测量树高和枝下高,使用皮尺测量两个主方向的冠幅。在超级样地旁边的开阔区采用 DGPS(Differential Global Position System)建立测量控制点,样地内每株树的位置使用全站仪精确测定。经全站仪校核,DGPS 测量控制点的反算边长与全站仪实测边长校差为 +33 mm,子样地内全站仪测量点的闭合差纵坐标误差为 9 mm,横坐标误差 -11 mm,高程误差 -33 mm。DGPS 数据与 LIDAR 数据的投影坐标系相同,全站仪数据统一到 DGPS 投影坐标系统中。

对样带样地内每株树测量胸径、树高、冠幅和枝下高。样带走向与飞行航线一致,方位角为北偏东 115°,样带与样地有部分重合。样带上的 1 号样地位于超级样地的中心。对于样地中心采用 DGPS 进行精确定位,并对每个样地的方位角进行了测量,样带与超级样地的位置示意图见图 1,白色方块为样带样地。

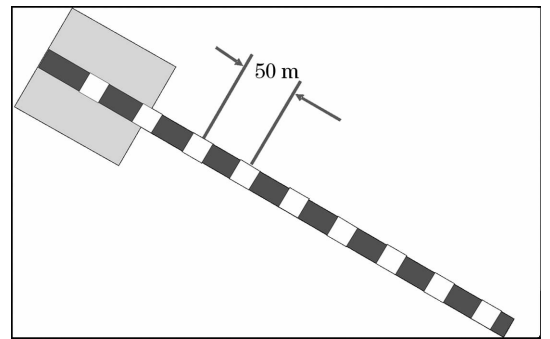


图 1 样地设置分布图

Fig. 1 Forest plots position of study area

3 研究方法与技术路线

3.1 森林参数计算

本文选取林分平均高、林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量作为反演参数。林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径是将样地内每株树的相应观测值取算术平均得到。林分密度是指株数密度,即单位面积上的林木株数,以株/hm²为单位。单位面积林分地上生物量以 t/hm² 为单位。对林分平均高和地上生物量的计算介绍如下。

林分平均高(H)采用断面积加权法计算,计算公式如下:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^k h_i g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \tag{1}$$

式中: h_i 为第 i 株林木的树高, g_i 为第 i 株林木的胸高断面积, k 为林分株数。

地上生物量的计算采用王金叶等^[10]提出的青海云杉各器官生物量的相对生长方程,单株树的干、枝、叶、果的地上生物量计算公式见式(2)~(5),式中 DBH 为胸径, H 为树高。干、枝、叶、果各组分地上生物量之和为单株地上生物量。将样地内每棵树的地上生物量相加得到样地地上生物量。

干(S) = 0.0478 × ($DBH^2 \times H$)^{0.8665} (2)

枝(S) = 0.0061 × ($DBH^2 \times H$)^{0.8905} (3)

叶(L) = 0.2650 × ($DBH^2 \times H$)^{0.4701} (4)

果(F) = 0.0342 × ($DBH^2 \times H$)^{0.5779} (5)

3.2 单株木参数提取方法

本文采用了刘清旺等^[11]提出的单株木估测算法。LIDAR 处理流程如下:

(1) 生成数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model):在 Terrasolid 软件的支持下,分离出地面点,将地面点插值成 0.5 m 分辨率的 DEM。

(2) 生成数字表面模型 DSM (Digital Surface Model):首先将点云数据栅格化,当栅格单元内有多个回波点时,取其最大值作为像元值;栅格数据内插,根据 0 值像元的非 0 邻域像元进行内插,取其平均值作为内插值,根据点云密度,将 DSM 插值成 0.5 m 的分辨率。

(3) 生成冠层高度模型 CHM (Canopy Height Model),将 DSM 与 DEM 作差值处理得到 CHM。对 CHM 进行平滑处理,平滑算法使用 3 × 3 窗口搜索局部最小值,使用邻域像元的平均值填充局部最小值。

(4) 通过搜索局部最大值提取树高,采用双正切角树冠识别算法识别树冠。最终得到单株木的位置、树高和冠幅。

3.3 样地尺度森林参数估测方法

采用多元线性逐步回归分析方法建立实测样地森林结构参数林分平均高、林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量与 LIDAR 提取参数之间的关系(表 1)。典型变量为 LIDAR 提取的样地尺度(格网大小为 20 m × 20 m)上的统计量:Count_ha(每公顷株数),H_ave(平均树高),H_max(最大树高),H_min(最小树高),H_std(树高方

差),CD_ave(平均冠幅),CD_max(最大冠幅),CD_min(最小冠幅),CD_std(冠幅方差),因变量为实测森林参数,包括林分平均高、林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度和地上生物量。

表 1 多元线性逐步回归的变量

Table 1 Variables of stepwise multiple regression

自变量(LIDAR 提取参数)	因变量(实测参数)
树高参数 H_ave(平均树高) H_max(最大树高) H_min(最小树高) H_std(树高方差)	林分平均高 林分算术平均高 平均冠幅 平均胸径 林分密度 地上生物量
冠幅参数 CD_ave(平均冠幅) CD_max(最大冠幅) CD_min(最小冠幅) CD_std(冠幅方差)	
林分密度 Count_ha(每公顷株数)	

3.4 技术路线

技术路线见图 2。首先从 LIDAR 点云数据分离出地面点与非地面点,由地面点生成 DEM,由所有点生成 DSM。两者之差得到 CHM,然后进行单株木位置、树高、冠幅的提取。将 LIDAR 提取的树高、冠幅通过树的位置与实测树的树高、冠幅进行匹配识别,进行单株木识别精度分析。在单株木识别的基

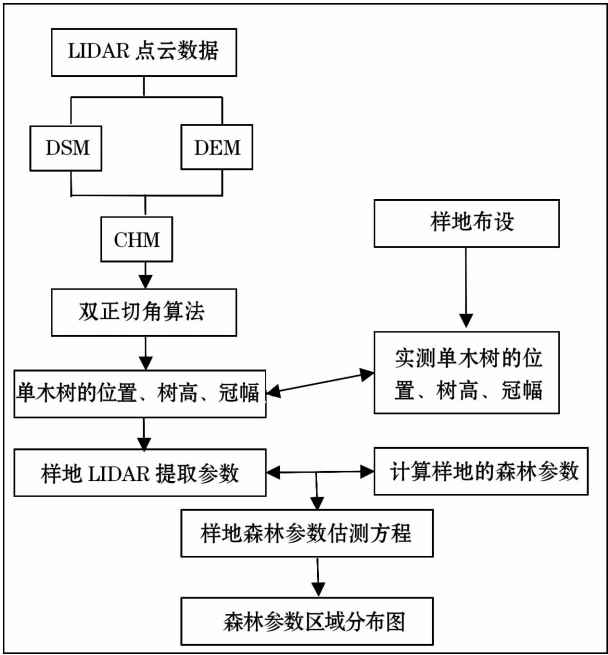


图 2 技术流程图

Fig. 2 Flow chart of forest structural parameters extraction

础上,通过多元回归分析,建立以样地为尺度的森林参数估测方程,最后得到森林参数的空间分布图。

4 结果与分析

4.1 单株木识别结果

超级样地实测林木株数为 1 465,基于 LIDAR 共识别出 466 株,由于识别树冠多边形可能包含不止一个野外实测树,将多边形内野外实测树树高最大的作为匹配树,并且去除掉明显存在匹配误差的点,最终采用可精确匹配的 415 株林木的参数进行回归分析。从图 3 可以看出,树高的识别精度较高,相关系数 R^2 为 0.785。但 LIDAR 提取树高范围只在 7~18 m 之间,而实测树高的范围是在 4~23 m 之间。树高较小的没有提取出来,一方面与平滑算法有关,另一方面较矮的树在大树的遮蔽下成为受压木而无法通过 LIDAR 提取到树木顶点。LIDAR 的最大树高也比实测树高要小,是由于 LIDAR 密度不够大错失树冠顶点造成的。从图 4 可以看出,冠幅的识别精度较低, R^2 仅为 0.380,其原因是超级样地树的密度较大,树冠之间相互重叠,而 LIDAR 提取的树冠多边形没有考虑树冠的重叠。

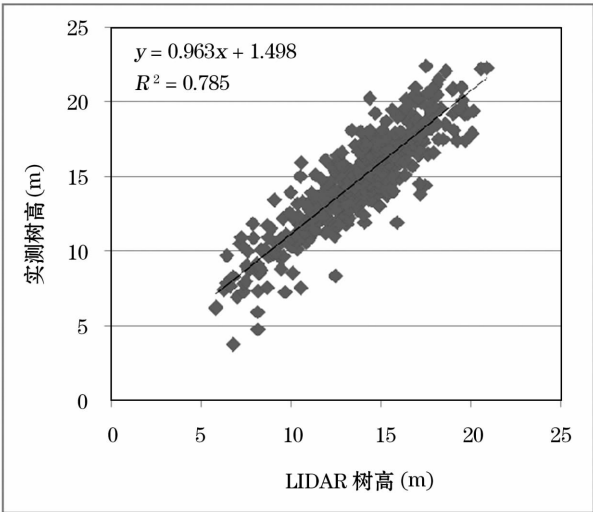


图 3 LIDAR 树高与实测树高比较

Fig.3 Comparision of tree height from LIDAR and field

4.2 森林参数估测方程

采用多元线性回归分析方法建立林分平均高、林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量的估测方程(表 2)。估测方程在 0.01 水平上显著,可以用于估测区域的森林参数分布。由于实测样地数据较少,全部用于构建方程。从表 2

可以看出,林分平均高、平均冠幅、平均胸径的典型变量均为 H_{ave} ,林分算术平均高不仅与 H_{ave} 有关,还与 $Count_{ha}$ 相关。林分密度的典型变量为 H_{ave} 、 H_{max} 、 H_{min} 。地上生物量的典型变量为 H_{ave} 和 $Count_{ha}$ 。图 5 列出了林分平均高、林分算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量的估测值与实测值之间的散点图。

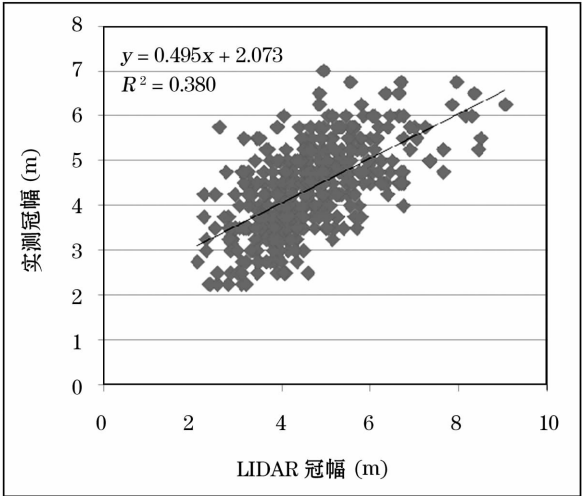


图 4 LIDAR 冠幅与实测冠幅比较

Fig.4 Comparision of crown diameter from LIDAR and field

4.3 森林参数分布图生成

首先将试验区按 20 m×20 m 网格大小进行分割,然后按网格统计 LIDAR 识别树的 $Count_{ha}$ 、 H_{ave} 、 H_{max} 、 H_{min} 、 H_{std} 、 CD_{ave} 、 CD_{max} 、 CD_{min} 、 CD_{std} ,然后根据建立的森林参数估测方程得到每个网格的森林参数值(图 6)。估测的林分平均高、算术平均高、平均冠幅、平均胸径、林分密度、地上生物量的范围分别为 0~29 m,0~23 m,0~6 m,0~37 cm,0~3 107 株/hm²,0~200 t/hm²。

5 结 论

本文以黑河流域祁连山大野口森林区为研究区,采用高密度 LIDAR 小脚印点云数据,在进行单木结构参数提取的基础上,实现了 20 m×20 m 格网大小森林参数的提取,最终得到了精度较高的森林参数分布图。这些森林参数分布图对于森林可持续经营管理以及林相图的更新等具有重要意义,同时对小流域森林水文科学的研究具有重要的应用价值。

表 2 多元线性逐步建立的森林参数估测方程
Table 2 Stepwise multiple regression results

参数	典型变量	标准误差	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调节 <i>R</i> ²	模型
林分平均高	H_ave	1.203	0.855	0.731	0.723	$-1.664 + 1.158H_{ave}$
林分算术平均高	H_ave	1.297	0.854	0.729	0.713	$-9.058 + 1.187$ $H_{ave} + 0.006 \text{ Count}_{ha}$
平均冠幅	H_ave	0.364	0.740	0.548	0.534	$0.188 + 0.232 H_{ave}$
平均胸径	H_ave	2.495	0.767	0.588	0.576	$-8.787 + 1.739 H_{ave}$
林分密度	H_ave, H_min, H_max	321.542	0.745	0.555	0.514	$3127.291 - 331.685H_{ave}$ $+ 98.383H_{min} + 103.604H_{max}$
地上生物量	H_aveCount_ha	15.251	0.859	0.738	0.722	$-121.445 + 11.468$ $H_{ave} + 0.172 \text{ Count}_{ha}$

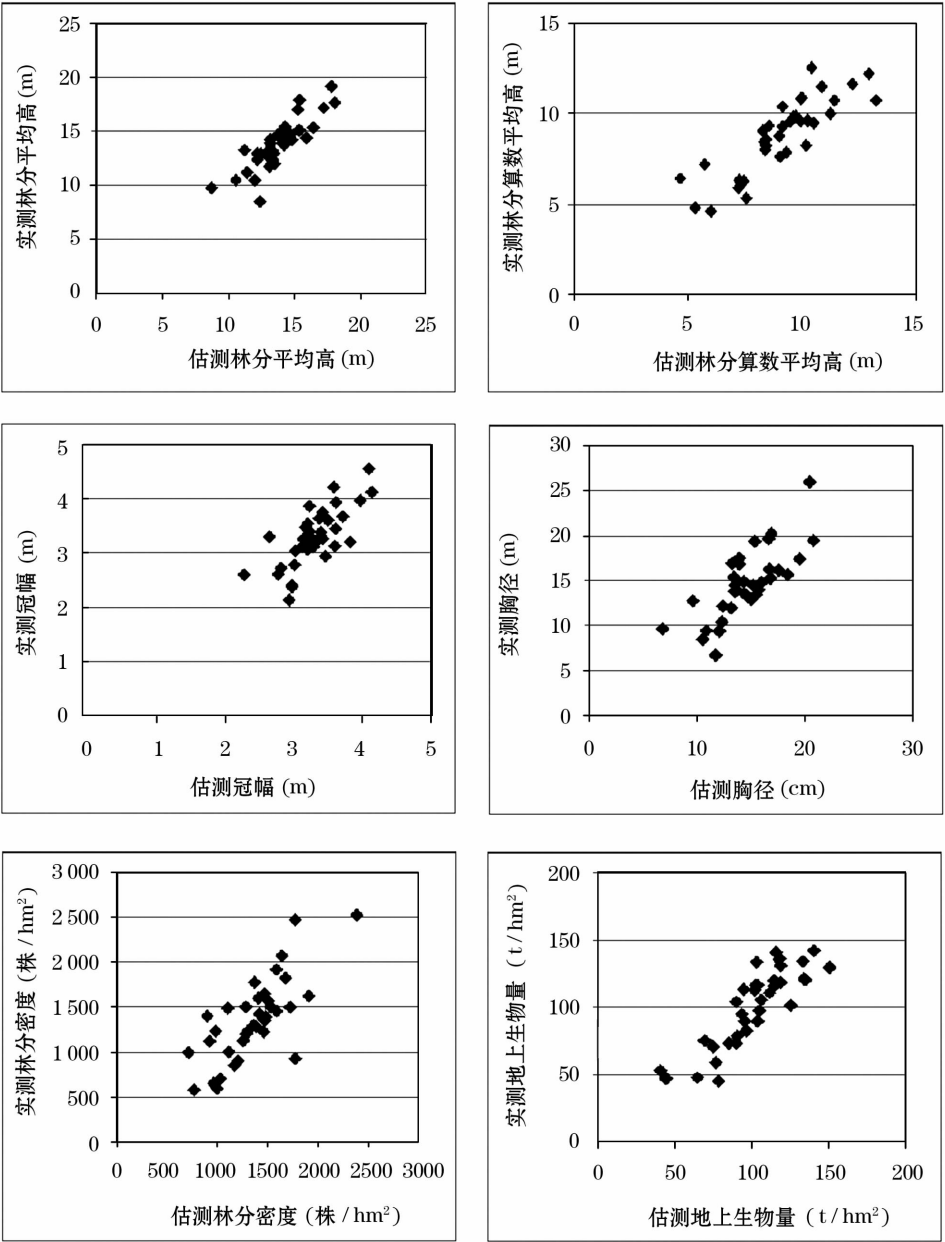


图 5 实测森林参数与 LIDAR 估测森林参数的散点图
Fig. 5 Scatterplots of predicted vs. field forest parameters

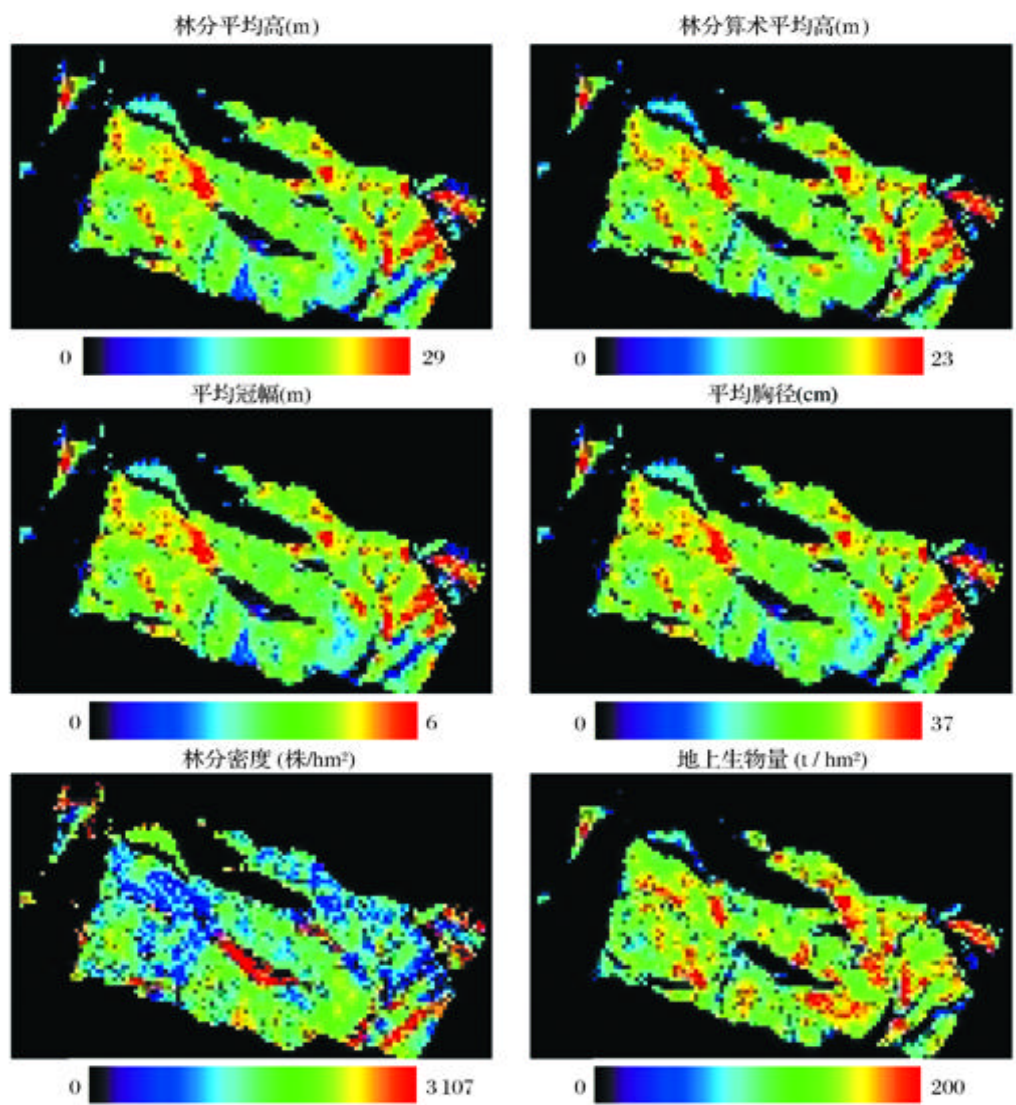


图 6 森林参数区域分布图

Fig.6 Spatial distribution of forest parameters

LIDAR 数据提取森林参数的精度受到点云密度以及森林结构的影响,点云密度较高,可以得到单棵树木的信息;点云密度较低,只能得到林分尺度的信息。森林结构简单的林分较复杂的林分只要低密度的点云就可以得到较好的结果。一般来说,LIDAR 可以较好地反映优势木以及亚优势木的信息,而对于受压木的信息反映较少。在本文的研究中,提取的单木树高基本为优势木以及亚优势木,对于受压木提取较少。同时受点云密度的影响,LIDAR 的最大树高也比实测树高要小,是由于 LIDAR 错失树冠顶点造成的,要提取精度较高的树高信息需要更高点云密度的 LIDAR 数据。在冠幅的提取中,由于树冠之间的相互遮蔽,造成冠幅的识别精度不高,使得后续建立的森林参数估测模型中没有将冠幅作为典

型变量,而仅是将树高和株数密度引入到了估测模型中,后续的研究需要提高单株木树冠的识别精度,有望进一步提高森林参数的估测精度。

按 20 m ×20 m 格网大小提取森林参数,林分平均高、林分算术平均高、地上生物量的估测方程精度较高, R^2 均大于 0.7。生物量与树高和树密度典型相关,这与实际比较符合,得到了较好的结果。生物量是森林固碳能力的重要标志和评估森林碳收支的重要参数。从中可以看出,LIDAR 也是研究森林碳源碳汇的重要数据。

参考文献(References):

- [1] Pang Yong, Li Zengyuan, Chen Erxue, et al. LiDAR remote sensing technology and its application in forestry[J]. Scientia Sil-

- vae Sinicae*, 2005, 41(3):129-136. [庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2005, 41(3):129-136.]
- [2] Mats Nilsson. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LIDAR systems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56(1):1-7.
- [3] Means J E, Acker S A, Harding D J, *et al.* Use of large-footprint scanning airborne LIDAR to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3):298-308.
- [4] Popescu S C, Wynne R H, Nelson R F. Estimating plot-level tree heights with LIDAR-local filtering with a canopy-height based variable window size [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 37(13):71-95.
- [5] Lefsky M A, Harding D, Cohen W B, *et al.* Surface LIDAR remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(1):83-98.
- [6] Drake J B, Dubayah R O, Clark D B, *et al.* Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LIDAR [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(23):305-319.
- [7] Lim K, Paul Treitz, Ian Morrison, *et al.* Estimating aboveground biomass using LIDAR remote sensing [C] // Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology IV Conference. Crete; Agia Pelagia, Greece, 2002.
- [8] Pang Yong, Sun Guoqing, Li Zengyuan. Large footprint LIDAR waveform modelling of forest spatial patterns [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1):97-103. [庞勇, 孙国清, 李增元. 林木空间格局对大光斑激光雷达波形影响模拟[J]. 遥感学报, 2006, 10(1):97-103.]
- [9] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe river basin: Scientific objectives and experiment design [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9):897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9):897-914.]
- [10] Wang JinYE, Ju Kejun, Fu Huien, *et al.* Study on biomass of water conservation forest on north slope of Qilian mountains [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1998, 18(4):319-323. [王金叶, 车克钧, 傅辉恩, 等. 祁连山水源涵养林生物量的研究[J]. 福建林学院学报, 1998, 18(4):319-323.]
- [11] Liu Qingwang, Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* Extracting individual tree heights and crowns using airborne LIDAR data [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(6):83-89. [刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6):83-89.]

A Study of Forest Parameters Mapping Technique Using Airborne LIDAR Data

HE Qisheng^{1,2,3}, CHEN Erxue³, CAO Chunxiang¹,
LIU Qingwang³, PANG Yong³

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, State Laboratory for Forest Remote Sensing and Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Estimating spatial forest stand variables such as mean height, mean crown diameter, mean diameter breast height DBH, tree density and aboveground biomass is important for sustainable forest management. This study aimed to estimate forest stand variables in coniferous tree species of *Picea crassifolia* stand in the Qilian Mountain, western China from single tree detection using small-footprint airborne LIDAR data. Based on the LIDAR data, a canopy height model (CHM) was firstly computed as the difference between tree canopy hits and the LIDAR terrain elevation values. In this study, a double-tangents crowns recognition algorithm was used to extract single tree location, height and crown polygon.

Stepwise multiple regression models were used to develop equations relating LIDAR-derived parameters, such as tree height, stand density and crown width, with observed forest parameters for each sample plot. The precision of equation for estimating mean stand height, tree density and aboveground biomass is high, with R^2 bigger than

Key words: LIDAR; Forest parameters estimation; Dayekou area in the Heihe River Basin.

《地球科学进展》编辑部
2009 年 7 月