

# 基于地基激光雷达的单木森林参数提取分析

傅根深<sup>1</sup>, 陈健<sup>2</sup>, 黄庆丰<sup>1</sup>, 唐雪海<sup>1\*</sup>

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 安徽合肥 230061; 2. 苍穹数码技术股份有限公司, 北京 100176)

**摘要** [目的]利用激光雷达手段大范围估算森林参数。[方法]以安徽省黄山市休宁县岭南林场森林资源为研究对象,通过地面调查获取3种森林类型单木胸径和树高数据,并同步使用地基激光雷达获取点云数据,利用Hough变换检测算法提取每木胸径和树高,在Matlab2020a软件下构建基于地面调查数据和激光雷达提取值的估算模型。[结果]针叶林、阔叶林和毛竹林的胸径估测精度( $R_c^2$ )分别为0.921、0.921和0.996, RMSE<sub>c</sub>分别为2.080、2.460和0.291,模型表现显著;树高估测精度分别为0.908、0.846和0.500, RMSE<sub>c</sub>分别为1.120、1.620和1.210。[结论]该研究可为运用激光雷达手段大范围估算森林参数提供依据,也可为森林类型点云识别与分割提供参考。

**关键词** 岭南林场;地基激光雷达;森林参数;回归分析;精度评价

中图分类号 S758 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)04-0128-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.04.033



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Extraction and Analysis of Forest Parameters for Individual Tree Based on Terrestrial Laser Scanning

FU Gen-shen<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, HUANG Qing-feng<sup>1</sup> et al (1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230061; 2. KQ GEO Technologies Co., Ltd, Beijing 100176)

**Abstract** [Objective] To estimate forest parameters in a wide range by lidar. [Method] The study studied by forest resources in Lingnan forestry site, Xiuning County, Anhui Province, single wood diameter at breast height and tree height data of three forest types were obtained by ground survey, and their point cloud data were obtained simultaneously by terrestrial laser scanning (TLS). Each wood diameter at breast height and tree height were extracted by Hough transform detection algorithm, and an estimation model based on ground survey data and TLS extracted values was constructed under Matlab2020a software. [Result] The results showed that the estimation accuracy ( $R_c^2$ ) of breast diameter was 0.921, 0.921 and 0.996 for coniferous, broadleaf and moso bamboo forests, respectively, with RMSE<sub>c</sub> of 2.080, 2.460 and 0.291, and the model performance was significant; the estimation accuracy of tree height was 0.908, 0.846 and 0.500, respectively, with RMSE<sub>c</sub> of 1.120, 1.620 and 1.210, respectively. [Conclusion] This study can provide a basis for estimating forest parameters in a large scale by TLS, and also provide a reference for forest type point cloud identification and segmentation.

**Key words** Lingnan forest farm; Terrestrial laser scanning; Forest parameters; Regression analysis; Precision evaluation

树木胸径和树高是森林调查中常用的参数,传统方法是通过胸径卷尺和测高器进行测量获取,但是这种方法存在着工作量大、人为误差等不足。除此之外,对于地形复杂、坡度大、调查人员难以进入的区域,这些林木因子获取难度较大。遥感技术一定程度上能够弥补这些不足,光学遥感技术在二维平面能够获得较好的水平森林参数,但是在获取树高、胸径、密度等三维参数时显得不足。作为一种新兴的主动遥感技术,激光雷达发射的激光脉冲则可轻易地从树木顶端到达地表,甚至穿透地表到达土壤内部,这种获取森林垂直结构参数的技术目前大部分光学遥感传感器难以做到<sup>[1]</sup>。地基激光雷达(terrestrial laser scanning, TLS)是一种基于激光的新型遥感仪器,通过光束偏转机制获取地表物体的三维点云数据,可以同时量测较高精度的地物范围和地物之间的角度, TLS获取的点云数据具有高密度、高精度等特点,可轻易捕捉林分尤其是下层林分的结构信息,这对于精确掌握森林生态系统的变化并研究这些变化对整个陆地生态系统的影响起着举足轻重的作用<sup>[2]</sup>。但是,由于大部分森林冠层之间相互遮挡的影响,机载激光雷达(airborne LiDAR scanning, ALS)则难以准确分离乔木层下的灌木和草本, ALS的优势体现在大区域森林垂直结构的快速获取, TLS则要耗费庞大的

人力物力才能做到<sup>[3]</sup>。

TLS技术在林业中的应用可以追溯到2002年,其以快速、无损、自动的方式获取胸径、树高、树冠宽度、郁闭度等森林参数<sup>[4-7]</sup>。研究表明,从TLS点云中提取胸径的方法很多,如二维曲线拟合、圆检测、圆柱拟合等,并都得到了较高的拟合精度<sup>[8-9]</sup>。Ma等<sup>[10]</sup>使用协方差特征分类得到叶片点云并实现了LAI的反演。赵方博等<sup>[11]</sup>通过对数据预处理提取出树冠点云,将其模拟为半球图像后运用球极平面投影和Lambert方位角等面积投影,通过统计面积的方法分别计算不同投影方法和图像划分方法下的孔隙率,进而计算出真实叶面积指数。骆钰波等<sup>[12]</sup>以主干点云为基础,采用迭代最小二乘拟合圆柱的方法自动提取树木位置、胸径;构建点云的八叉树结构,利用体素的空间邻接性实现点云分割,自动提取树高,估测 $R^2$ 超过0.9。马振宇等<sup>[13]</sup>基于自适应临近搜索法和递归特征排除法(RFE)筛选重要变量进行随机森林分类,有效提取倒木数据。张天安等<sup>[14]</sup>通过对原始点云进行枝叶分离并根据Dijkstra距离法和加权匹配法获取活立木单株点云,分别构建了含笑和樱花的枝干三维模型。杨水荣等<sup>[15]</sup>采用切片形式的Alpha Shape 3D法估算树木冠层体积,并定量反映树木冠层分布及体积变化情况。

笔者以安徽省黄山市休宁县岭南林场为研究区域,通过样地设置及样木调查,获取针叶林、阔叶林、毛竹林3种森林类型的单木胸径及树高数据。综合利用GPS、全站仪、TLS获取样木的激光点云数据,通过坐标匹配实现单木与激光数

**基金项目** 安徽省自然科学基金项目(1808085QC74)。

**作者简介** 傅根深(1997—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向:森林经理。\*通信作者,讲师,博士,从事森林资源经营管理和林业3S技术研究。

**收稿日期** 2021-06-15

据的吻合,在此基础上提取样木的胸径和树高,并进一步构建 3 种森林类型单木的胸径和树高估测模型,利用留一法验证模型的精度。通过对森林参数的精确估测,可为下一步应用机载激光雷达实现大区域森林参数估算提供科学依据,对开展森林蓄积量估算、森林生物量定量遥感模型构建、碳达峰和碳中和等生态监测具有重要意义。

## 1 研究区概况

研究数据均采集于安徽省黄山市休宁县岭南林场,林场位于安徽省最南端,与江西省交界(图 1)。岭南林场地处中纬度地带,属于北亚热带湿润季风气候,年均气温 16.2 °C,日

照时数 1 800 h 左右,无霜期 220 d。林场地形表现为丘陵—低山—中山 3 种类型,其中丘陵面积最大。土壤类型主要为黄壤、黄棕壤。林场森林覆盖率较高,植被分布具有典型的过渡地带特征,森林类型以针叶林、针阔混交林为主。常见的主要树种包括杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、枫香 (*Liquidambar formosana* Hance)、毛竹 [*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) Mitford cv. Pubescens]、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.)、栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.)、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*) 等。

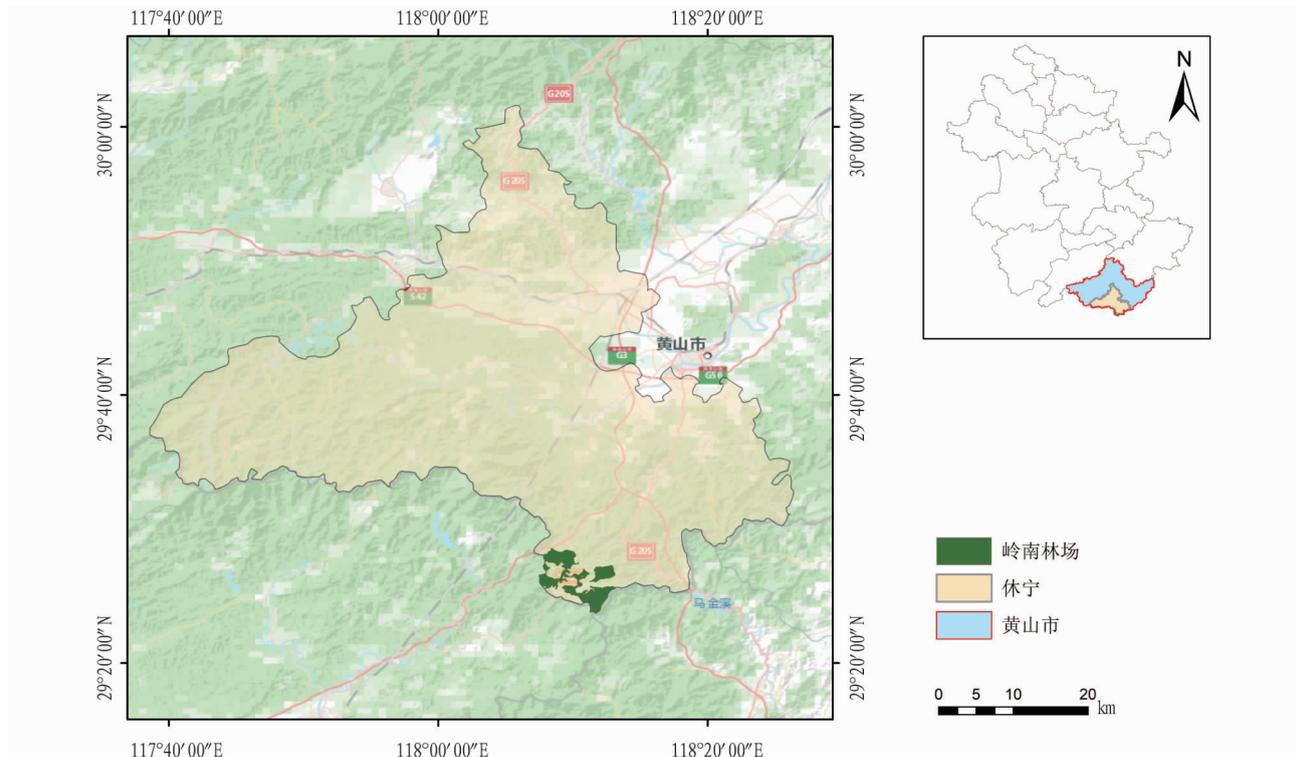


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

## 2 研究方法

**2.1 样木调查** 该试验涉及 3 种森林类型,分别为针叶林、阔叶林和毛竹林。样地设置为 20 m×20 m 的正方形。为了精细提取单木森林参数,每木检尺以 2 cm 为起测胸径,采用传统的胸径卷尺进行测量,使用激光测高器获取单木树高。利用全站仪、罗盘仪、皮尺获取样地 4 个角点位置,通过静态 GPS 获取其坐标。

**2.2 激光点云数据采集** 利用 Trimble TX8 设备进行地面样木点云数据采集。Trimble TX8 具有轻便、携带方便的特点,最大扫描距离达到 340 m,激光点云高达 555 百万点,垂直扫描角度为 317°,激光波长达到 1 500 nm。每个样地在样地的 4 个角点和中心位置共设置 5 个扫描站点。每站扫描时间为 10 min。

**2.3 数据坐标匹配** TLS、GPS、全站仪数据采集完毕后,利用 TLS 仪器自带 Trimble RealWorks 系统软件对采集到的原始 TLS 数据进行反射靶标识别、多站拼接、坐标转换和生成

点云等预处理操作,利用后处理软件对 GPS 数据进行差分处理,对全站仪坐标数据进行点校正处理,以实现单木坐标的匹配<sup>[16]</sup>。

**2.4 激光点云数据处理** 由于受到目标物体的表面形状、方向和纹理的影响,激光脉冲被反射后形状会发生改变,尤其是扫描到目标物边缘或发射脉冲通过植被时都将较大地改变反射脉冲形状,从而产生较大偏差。原始的点云数据会接收到多个地物的回波信息,并产生密度非常高的点云数据,在进行森林参数(如胸径和树高)提取时,只需要保留树干最外部点云即可。利用 TerraSolid 软件的 TerraScan 模块对初始点云数据进行预处理,主要包括数据过滤、非树干点去除、数据抽稀<sup>[16]</sup>。

**2.5 森林参数提取** 利用 Hough 变换检测算法来估测样地内每个单株立木的胸径,然后根据树木的形态学特征,通过设置一系列阈值去除非树干处的拟合圆,可提高单木的位置与胸径识别精度<sup>[1]</sup>。最后,通过地基激光雷达扫描数据获取的单

木树干生长方向与该方向上的单木垂直结构提取单木高<sup>[16]</sup>。

**2.6 森林参数估测模型构建及精度验证** 在 Matlab2020a 环境下利用回归分析方法分别构建基于实际测量值和 TLS 提取值的单木胸径、树高估测模型。最后采用留一法交叉验证对构建的胸径、树高估测模型进行精度验证。留一法交叉验证是指每个森林类型中采集到  $n$  株样本,每次选取 1 个样本作为测试集,其余样本( $n-1$ )作为训练集。循环迭代需要运算  $n$  次训练,最后取  $n$  次训练的平均值进行检验。利用决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE、 $P$  值等作为建模过程的评价

指标。

**3 结果与分析**

**3.1 样木数据处理结果** 针叶林样地主要树种为杉木,根据现场调查及 TLS 提取数据,共得到有效样木 70 株。阔叶林样地主要树种为木荷、短柄栎、榿木、甜槠等,优势树种为木荷,有效样木 119 株。毛竹林有效样木 320 株。

**3.2 3 种森林类型单木胸径估测模型构建** 在 Matlab2020a 软件环境下,利用回归分析得到 3 种森林类型单木胸径估测模型,结果见图 2。3 种森林类型建模及检验结果见表 1。

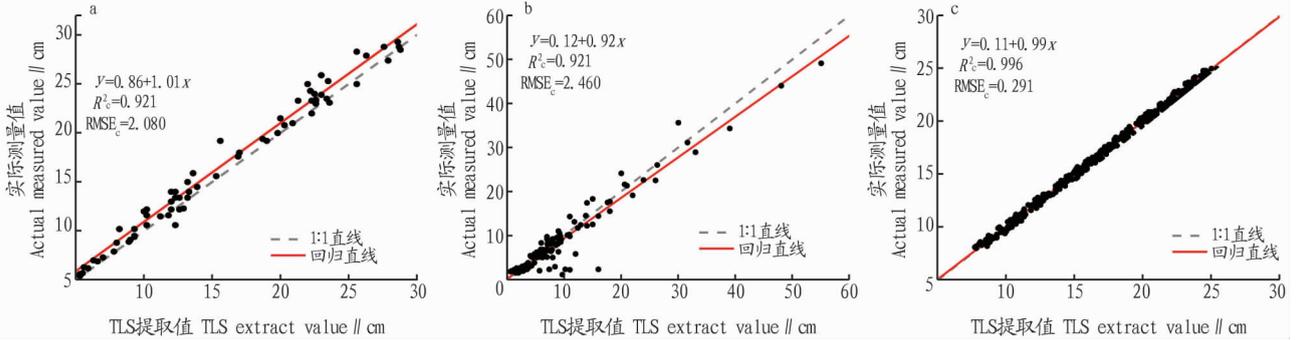


图 2 针叶林(a)、阔叶林(b)和毛竹林(c)单木胸径估测模型

Fig.2 Estimation model of DBH for individual tree of coniferous forest (a), broad-leaved forest (b), moso bamboo forest (c)

表 1 3 种森林类型胸径模型参数

Table 1 Parameters of DBH model of three forest types

类型 Type	参数 Parameter	P 值 P value	建模指标 Calibration		验证指标 Validation	
			决定系数 $R_c^2$	均方根误差 RMSE <sub>c</sub>	决定系数 $R_v^2$	均方根误差 RMSE <sub>v</sub>
针叶林 Coniferous forest	截距 $a$	0.17	0.921	2.080	0.917 8	2.084 7
	系数 $b$	0				
阔叶林 Broad-leaved forest	截距 $a$	0.71	0.921	2.460	0.918 6	2.476 5
	系数 $b$	0				
毛竹林 Moso bamboo forest	截距 $a$	0.06	0.996	0.291	0.996 4	0.292 3
	系数 $b$	0				

由图 2 和表 1 可知,3 种森林类型的胸径估测精度( $R_c^2$ )分别为 0.921(针叶林)、0.921(阔叶林)和 0.996(毛竹林),0.05 水平下均达到显著。验证精度( $R_v^2$ )分别为 0.917 8(针叶林)、0.918 6(阔叶林)和 0.996 4(毛竹林),以毛竹林估测精度最高。岭南林场毛竹林均为人工林,造林密度合适,林相整齐,林下无杂灌,TLS 扫描无视线盲区,点云处理和提取效果较好。针叶林和阔叶林林分中树木胸径大小不一,特别是

阔叶林,该林分为天然次生林,该试验单木胸径多集中于 0~20 cm 区间段,这也导致在扫描时,胸径大的树木会对小树产生遮挡。

**3.3 3 种森林类型单木树高估算模型构建** 在 Matlab2020a 软件环境下,利用回归分析得到 3 种森林类型单木树高估测模型,结果见图 3。3 种森林类型建模及检验结果见表 2。

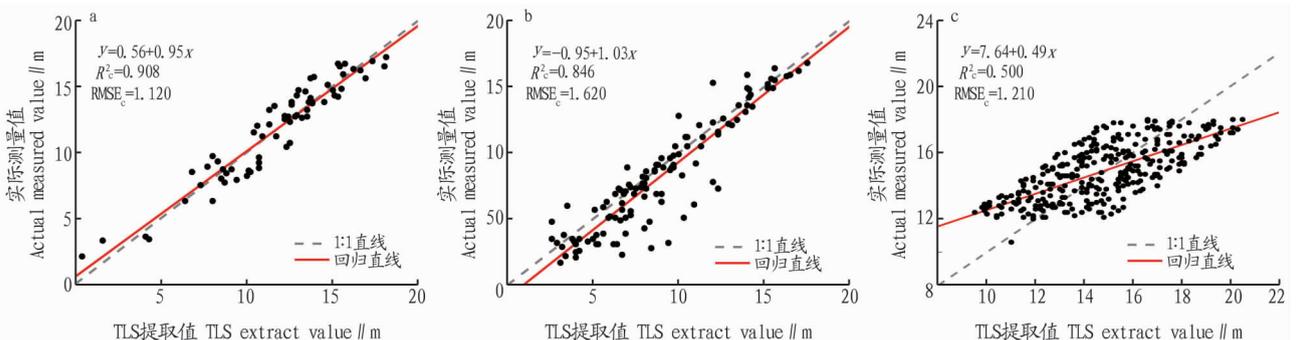


图 3 针叶林(a)、阔叶林(b)、毛竹林(c)单木树高估测模型

Fig.3 Estimation model of tree height for individual tree of coniferous forest (a), broad-leaved forest (b), moso bamboo forest (c)

表 2 3 种森林类型树高模型参数

Table 2 Parameters of tree height model of three forest types

类型 Type	参数 Parameter	P 值 P-value	建模指标 Calibration		验证指标 Validation	
			决定系数 $R_c^2$	均方根误差 RMSE <sub>c</sub>	决定系数 $R_v^2$	均方根误差 RMSE <sub>v</sub>
针叶林 Coniferous forest	截距 $a$	0.22	0.908	1.120	0.902 8	1.138 0
	系数 $b$	0				
阔叶林 Broad-leaved forest	截距 $a$	0.02	0.846	1.620	0.841 6	1.629 9
	系数 $b$	0				
毛竹林 Moso bamboo forest	截距 $a$	0	0.500	1.210	0.495 9	1.211 9
	系数 $b$	0				

由图 3 和表 2 可知,3 种森林类型的树高估测精度( $R_c^2$ )分别为 0.908(针叶林)、0.846(阔叶林)和 0.500(毛竹林),0.05 水平下均达到显著。验证精度( $R_v^2$ )分别为 0.902 8(针叶林)、0.841 6(阔叶林)和 0.495 9(毛竹林),针叶林估测精度最高。针叶林为杉木人工林,该类型林相整齐,树干笔直,林下杂灌对点云处理影响较小,阔叶林估测精度次之,通过分析,该类型中的甜槠和马尾松由于上层分枝较多,与旁边较为低矮树木交叉遮挡导致树高点云出现误差,在 10 m 以下的树木下表现尤为严重。毛竹林树高估测精度最低,仅为 0.500,这是由于毛竹生长速度较快,尽管胸径普遍低于针叶林和阔叶林,但是树高较高,越往上端,竹梢偏离垂直方向程度越大,冠层顶部遮挡较为严重,识别起来比较困难。

## 4 结论与讨论

**4.1 结论** 该研究利用 TLS 对安徽省黄山市休宁县岭南林场 3 种森林类型样地进行扫描,通过每木检尺获取其胸径和树高,通过 TerraSolid 软件进行点云处理并利用 Hough 变换检测算法提取样木胸径和树高。在此基础上,利用 Matlab2020a 软件构建胸径和树高估算模型,得到结论如下:

(1) 针叶林胸径估算模型为  $y = 0.86 + 1.01x$ ,  $R_c^2 = 0.921$ ,  $RMSE_c = 2.080$ ,  $P < 0.05$ , 达到显著水平;通过留一法验证,  $R_v^2 = 0.917 8$ ,  $RMSE_v = 2.084 7$ 。阔叶林胸径估算模型为  $y = 0.12 + 0.92x$ ,  $R_c^2 = 0.921$ ,  $RMSE_c = 2.460$ ,  $P < 0.05$ , 达到显著水平;通过留一法验证,  $R_v^2 = 0.918 6$ ,  $RMSE_v = 2.476 5$ 。毛竹林胸径估算模型为  $y = 0.11 + 0.99x$ ,  $R_c^2 = 0.996$ ,  $RMSE_c = 0.291$ ,  $P < 0.05$ , 达到显著水平;通过留一法验证,  $R_v^2 = 0.996 4$ ,  $RMSE_v = 0.292 3$ 。

(2) 针叶林树高估算模型为  $y = 0.56 + 0.95x$ ,  $R_c^2 = 0.908$ ,  $RMSE_c = 1.120$ ,  $P < 0.05$ , 达到显著水平;通过留一法验证,  $R_v^2 = 0.902 8$ ,  $RMSE_v = 1.138 0$ 。阔叶林树高估算模型为  $y = -0.95 + 1.03x$ ,  $R_c^2 = 0.846$ ,  $RMSE_c = 1.620$ ,  $P < 0.05$ , 达到显著水平;通过留一法验证,  $R_v^2 = 0.841 6$ ,  $RMSE_v = 1.629 9$ 。毛竹林树高估算模型为  $y = 7.64 + 0.49x$ ,  $R_c^2 = 0.500$ ,  $RMSE_c = 1.210$ ,  $P < 0.05$ , 达到显著水平;通过留一法验证,  $R_v^2 = 0.495 9$ ,  $RMSE_v = 1.211 9$ 。

**4.2 讨论** 该研究选择的样木是在相同的地理条件下,尽管模型精度很高且达到显著水平,能否推广到所有森林类型还需要更多的样本支持。特别是对更小胸径的单体识别,对现有算法进行优化甚至引入更多图像分割技术是今后研究的重点。树木冠层的复杂性也为点云数据计算机自动识别和

归类带来一定的困难。

尽管 TLS 能够获取令人满意的估测结果,但是对于山区的森林调查进行大范围推广显然不太现实。近年来,ALS 在林业中也得到了推广应用,TLS 和 ALS 在点云密度、扫描角度、扫描速度等方面都存在差异,数据的处理流程也不尽相同。随着雷达技术的发展和行业需求的拓展,TLS 和 ALS 结合解决行业实际问题则是一个有效的手段<sup>[17-18]</sup>。

## 参考文献

- [1] 刘鲁霞. 机载和地基激光雷达森林垂直结构参数提取研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [2] 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望[J]. 科学通报, 2014, 59(6): 459-478.
- [3] 孙忠秋, 吴发云, 高显连, 等. 基于机载大光斑激光雷达的森林冠层高度估测[J]. 林业资源管理, 2020(3): 111-117.
- [4] 晏颖杰, 范少辉, 官凤英. 地基激光雷达技术在森林调查中的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 42-47.
- [5] KANKARE V, HOLOPAINEN M, VASTARANTA M, et al. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2013, 75(1): 64-75.
- [6] DASSOT M, CONSTANT T, FOURNIER M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges[J]. Annals of forest science, 2011, 68(5): 959-974.
- [7] LIU L X, PANG Y, LI Z Y, et al. Combining airborne and terrestrial laser scanning technologies to measure forest understorey volume[J]. Forests, 2017, 8(4): 1-14.
- [8] 刘鲁霞, 庞勇, 李增元. 基于地基激光雷达的亚热带森林单体胸径与树高提取[J]. 林业科学, 2016, 52(2): 26-37.
- [9] LIANG X L, LITKEY P, HYYPPA J, et al. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2012, 50(2): 661-670.
- [10] MA L X, ZHENG G, EITEL J U H, et al. Improved salient feature-based approach for automatically separating photosynthetic and nonphotosynthetic components within terrestrial Lidar point cloud data of forest canopies[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2016, 54(2): 679-696.
- [11] 赵方博, 王佳, 高赫, 等. 地面激光雷达的单体真实叶面积指数提取[J]. 测绘科学, 2019, 44(4): 81-86, 109.
- [12] 骆钰波, 黄洪宇, 唐丽玉, 等. 基于地面激光雷达点云数据的森林树高、胸径自动提取与三维重建[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 243-252.
- [13] 马振宇, 庞勇, 李增元, 等. 地基激光雷达森林近地面点云精细分类与倒木提取[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 743-755.
- [14] 张天安, 涂挺, 薛联凤, 等. 基于地面激光雷达的活立木枝干三维建模[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 163-167.
- [15] 杨水荣, 黄洪宇, 唐丽玉, 等. 基于地面激光雷达点云的树木冠层变化定量分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 8-14.
- [16] 陈健. 基于地基激光雷达的不同森林类型单体胸径与树高提取[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [17] 郭王, 程效军. 基于激光强度分类的机载与地面激光雷达点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 409-416.
- [18] 韩婷婷. 激光雷达数据在森林垂直结构参数反演中的应用综述[J]. 北京测绘, 2020, 34(8): 1061-1065.