网络出版时间:2026-03-13 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.09.002

基于背包式激光雷达的单木地上生物量估算

萨如拉[1],塔娜[1],张昊[1],王雨峰[1],郝帅[1,2],翟凯涛[1],滑永春[1],张欣[1]
(1 内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019;
2 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,内蒙古 根河 022350)

[摘 要] 【目的】探索背包式激光雷达与树木定量结构模型(accurate and detailed quantitative qtructure model,AdQSM)在森林结构参数提取及单木地上生物量(aboveground biomass,AGB)无损估测中的应用,为森林资源调查与碳储量评估提供科学依据。【方法】以内蒙古大兴安岭白桦天然次生林中的优势树种兴安落叶松(*Larix gmelinii*)与白桦(*Betula platyphylla*)为研究对象,采用背包式激光雷达获取点云数据,对点云进行单木分割,以野外实测数据为参考值评估其分割精度及胸径、树高的提取精度。基于AdQSM模型对单木点云进行三维重建,通过参数优化确定最佳建模参数分割高度(height segmentation,HS),将提取的胸径、树高、树干材积及树枝材积分别采用转换因子法与生物量模型法估算单木各器官生物量和AGB,并从不同树种、不同径阶、不同树高及不同林分密度等多个维度,利用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)对两种方法的估算精度进行评价。【结果】①单木分割总体精度F=0.96。背包式激光雷达提取的胸径精度较高,决定系数(R^2)平均值为0.98,均方根误差(RMSE)平均值为0.60 cm,而树高的提取精度较低,R^2平均值为0.60,RMSE平均值为2.22 m;②兴安落叶松和白桦AdQSM模型重建的最优参数HS=0.4 m;③生物量模型法估算各器官生物量的精度优于转换因子法。其中树干生物量估算精度较高(白桦R^2=0.96,RMSE=8.13 kg/株;兴安落叶松R^2=0.94,RMSE=14.54 kg/株),树枝生物量估算精度较低(白桦R^2=0.94,RMSE=3.29 kg/株;兴安落叶松R^2=0.93,RMSE=2.47 kg/株)。两种方法均能准确估算兴安落叶松和白桦单木AGB(R^2均大于等于0.92,RMSE介于13.14~18.47 kg/株)。大径阶(≥15 cm)、高大样木(≥11 m)和两种不同密度(低密度和高密度)样地采用两种方法均能获取准确的AGB估算结果(R^2最高达0.94),而小径阶(<15 cm)、低矮木(<11 m)使用转换因子法更优。【结论】背包式激光雷达可以有效获取单木结构参数,基于点云数据构建的AdQSM模型可以实现单木AGB的无损、高效估算,可为森林资源调查和碳储量研究提供参考。

[关键词] 单木生物量估算;背包式激光雷达;定量结构模型;兴安落叶松;白桦
[中图分类号] S758.1 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)09-0014-13

Estimation of individual tree aboveground biomass based on backpack LiDAR

SA Rula[1],TA Na[1],ZHANG Hao[1],WANG Yufeng[1],HAO Shuai[1,2],
ZHAI Kaitao[1],HUA Yongchun[1],ZHANG Xin[1]
(1 *Forestry College,Inner Mongolia Agricultural University,Hohhot,Inner Mongolia* 010019,*China*;2 *National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Greater Khingan Mountains,Genhe,Inner Mongolia* 022350,*China*)

Abstract:【Objective】The study aims to explore the application for extracting forest structural parameters and non-destructive estimation of individual tree aboveground biomass (AGB) using backpack LiDAR and the accurate and detailed quantitative structure model (AdQSM),providing a scientific basis for forest resource sur-

[收稿日期] 2025-10-17 [修回日期] 2026-01-16
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32460388);内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2023MS03051)
[作者简介] 萨如拉(1976—),女(蒙古族),内蒙古呼和浩特人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林资源经营管理研究。E-mail:sarula213@163.com
[通信作者] 张欣(1993—),女,内蒙古巴彦淖尔人,讲师,博士,主要从事森林生态和森林经营管理研究。E-mail:14794885888@163.com

veys and carbon stock assessment.【Method】Using the dominant tree species *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in the natural secondary birch forests of Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia as the research subjects, point cloud data was acquired via backpack LiDAR. Individual trees were segmented from the point clouds, and their segmentation accuracy along with the extraction accuracy of diameter at breast height (DBH) and tree height were evaluated against field measurement data as reference values. Based on the AdQSM model, three-dimensional reconstruction of individual tree point clouds was performed. Optimal modeling parameters (height segmentation HS) were determined through parameter optimization. The extracted DBH, tree height, stem volume, and branch volume were applied to estimate biomass of tree components and AGB, using conversion factor method and biomass modeling method, respectively. The estimation accuracy of the two methods was evaluated based on the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE) across multiple dimensions-different tree species, diameter classes, tree height, and stand density.【Result】① The overall accuracy for individual tree segmentation was $F=0.96$. The backpack LiDAR exhibited high accuracy in extracting diameter at breast height (DBH), with an average coefficient of determination (R^2) of 0.98 and an average root mean square error (RMSE) of 0.60 cm. However, its accuracy in tree height extraction was lower, with an average R^2 of 0.60 and an average RMSE of 2.22 m. ② The optimal parameter for the AdQSM model reconstruction of both *L. gmelinii* and *B. platyphylla* was HS=0.4 m. ③ The biomass model method demonstrated superior accuracy in estimating organ biomass compared to the conversion factor method. Specifically, trunk biomass estimated with higher precision (*B. platyphylla*: $R^2=0.96$, RMSE=8.13 kg/plant; *L. gmelinii*: $R^2=0.94$, RMSE=14.54 kg/plant), whereas branch biomass estimation exhibited lower accuracy (*B. platyphylla*: $R^2=0.94$, RMSE=3.29 kg/plant; *L. gmelinii* $R^2=0.93$, RMSE=2.47 kg/plant). Both methods accurately estimated the aboveground biomass (AGB) of individual *L. gmelinii* and *B. platyphylla* trees ($R^2\geqslant0.92$ for both, RMSE ranging from 13.14 to 18.47 kg/plant). For large-diameter trees (≥15 cm), tall trees (≥11 m), and plots of the two different density (low and high), both methods yielded accurate AGB estimates (maximum $R^2=0.94$), while the conversion factor method performed better for small-diameter (<15 cm) trees and short trees (<11 m).【Conclusion】Backpack LiDAR systems can effectively capture individual tree structural parameters. The AdQSM model based on the point cloud data enables non-destructive and efficient estimation of individual tree above-ground biomass (AGB), providing a valuable reference for forest resource surveys and carbon stock research.

Key words: individual tree biomass estimation; backpack-LiDAR; accurate and detailed quantitative structure model; *Larix gmelinii*; *Betula platyphylla*

森林生物量是评估生态系统碳储量和响应气候变化的重要指标，准确估算森林地上生物量对全球碳循环、森林资源状况和森林可持续经营研究等都具有重要意义[1]。传统的地上生物量（aboveground biomass，AGB）估算方法依赖于野外实测数据，虽精度较高但耗时费力，且难以扩展至大范围区域，同时会对森林造成一定破坏[2]。

近年来，激光雷达（light detection and ranging，LiDAR）技术因能够快速、精确地获取森林三维结构参数，已成为单木乃至林分尺度生物量估算的重要手段[3]。其中，背包式激光雷达系统是一种新兴的移动平台，兼具机动性强、成本较低和点云密度高等优势，为复杂林分环境下的单木结构参数提取提供了新的数据源。有学者比较了不同平台（地基、背包式和手持式）激光雷达扫描方法在估测胸径（DBH）、获取单木位置信息和数据采集效率方面的差异，结果发现背包式激光雷达效率最高，估测的胸径最接近真实值[4]。

在森林地上生物量估算方法上，有学者采用背包式激光雷达与机载激光雷达相结合的方法，提取单株树木的结构参数，然后将其输入异速生长方程，得到样本尺度的AGB[5]。除了传统的回归方法，定量结构模型（quantitative structure model，QSM）因其通过激光雷达点云重建单木的三维枝干几何结构，并且具有非破坏性估算树木体积的能力而受到关注[6]。因此，QSM算法被广泛应用于热带

森林中,有学者基于地基激光雷达点云构建单木三维结构模型估算热带森林AGB,并证明了QSM算法在复杂林分中的适用性[7-8]。在该研究基础上,DU等[9]和FAN等[10]通过提出AdTree和AdQSM方法进一步扩展了QSM,为准确获取具有详细树木形态特征的三维结构模型提供了几何基础,并能够提取胸径、树高和体积等单木参数。有研究通过LiDAR点云数据以及实测采样数据,验证了AdQSM方法估计单棵树木胸径、树高、体积和AGB的准确性[11]。上述研究多数采用地基激光雷达点云数据构建单木三维结构模型,而目前直接使用背包式激光雷达点云数据进行AGB估算的可行性研究还较少。因此,背包式激光雷达在森林结构参数提取方面尚存在巨大的发展空间和应用潜力。

内蒙古大兴安岭作为我国北方的生态屏障,准确估测其森林地上生物量对该地区的生态保护、森林资源管理及可持续发展具有重要意义。兴安落叶松(*Larix gmelinii*)与白桦(*Betula platyphylla*)是内蒙古大兴安岭地区的主要优势树种,具有分布广、适应性强、抗寒等特点[12]。本研究以6块白桦天然次生林固定样地为研究对象,采用背包式激光雷达扫描获取样地点云数据,基于树木定量结构模型,提取单木的胸径、树高以及树干、树枝体积等参数,分别利用生物量模型法和转换因子法估算其生物量,结合样地实测数据验证基于背包式激光雷达点云数据的单木结构参数以及生物量估算精度,旨在为研究建立高效、无损的单木AGB估算方法及合理森林经营和准确估算碳储量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市根河林业局潮查林场(50°49′—50°51′ N,120°30′—121°31′ E),地处大兴安岭西坡中段腹地,海拔800~1 100 m。根河林业局东邻甘河林业局,西接得耳布尔林业局和额尔古纳市,北靠金河林业局,南连图里河、伊图里河、克一河林业局。该地区属寒温带大陆性季风气候,寒冷潮湿,冬季漫长,夏季短暂,无霜期短,年、日温差较大。全年平均降水量约460 mm,年平均气温-5.4 ℃。该区主要树种为兴安落叶松和白桦。

1.2 数据获取

1.2.1 样地设置 在研究区内选取具有代表性6块白桦天然次生林固定样地,采伐类型均为渐伐林,分别设置了2块40 m×50 m和4块30 m×30 m的方形样地。在各样地中心点采用全球定位系统(GPS)进行定位,采集地理坐标。每木检尺内容包括测量并记录每株树的胸径、树高、冠幅以及每株树在样地内的相对位置。采用胸径尺测量样地内所有样木,记录胸径大于5 cm的单木,并采用布鲁莱斯光学测高仪测量树高。以样地两条垂直边界为坐标轴,利用50 m皮尺测量每棵树到两边的垂直距离,确定样地内单木相对位置,统计测量活立木株数。样地详细信息如表1所示。

表1 6块白桦天然次生林样地信息

Table 1 Information of the six plots in *Betula platyphylla* natural secondary forests

样地号 Plot	林分密度/(株·hm^{-2}) Stand density	树种组成/% Tree species composition		胸径/cm Diameter at breast height			树高/m Tree height		
		白桦 *Betula platyphylla*	兴安落叶松 *Larix gmelinii*	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max
1	978	90	10	14.6	5.0	27.0	15.5	5.0	27.0
2	889	80	20	16.7	5.8	30.2	17.0	2.1	25.2
3	1 823	80	20	8.6	5.4	21.5	10.9	5.9	17.3
4	2 500	60	40	9.1	5.0	25.5	10.1	5.4	19.4
5	1 545	60	40	9.1	5.0	18.0	10.2	5.2	16.0
6	2 550	60	40	8.4	5.0	24.7	7.9	3.2	18.9

1.2.2 背包式激光雷达数据采集 采用背包激光雷达扫描系统(LiBackpack DGC50,北京数字绿土有限公司)采集样地的点云数据,雷达系统参数如表2所示。

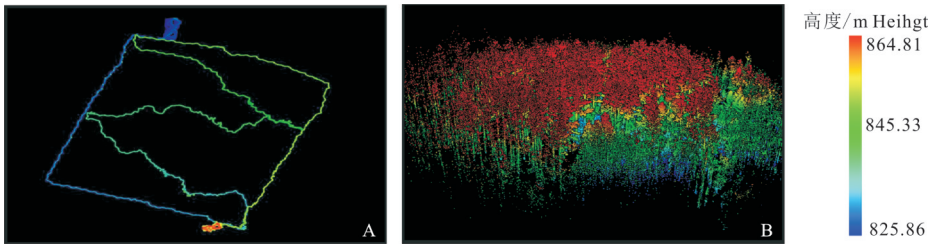
由于样地面积较大,为了保证能较为全面地获取样地内的点云数据,扫描路径采用了前人研究的最优路线[13],如图1-A中颜色渐变线所示,扫描路径从深色开始至浅色结束。测量人员将手机与背包式激光雷达系统建立连接,以实时监测卫星信号搜索状态与点云数据的采集情况。为保障点云数据质量,操作过程中需保持背包平台稳定,并在拐角或曲线路段缓慢行走。最终采集到的点云数据

按高程显示，如图 1-B 所示。

表 2　LiBackpack DGC50 扫描系统参数

Table 2　Parameters of the LiBackpack DGC50 scanning system

系统参数 System parameters	LiBackpack DGC50H	系统参数 System parameters	LiBackpack DGC50H
激光传感器 Laser sensor	Velodyne VLP-16×2	扫描距离/m Scan range	100
扫描频率/(点·s^{-1}) Scan rate	640 000	水平视场角/(°) Horizontal field of view	360
相对精度/cm Relative accuracy	3	垂直视场角/(°) Vertical field of view	180(−90°～90°)
绝对精度/cm Absolute accuracy	5	像素 Pixels	18 000 000
激光波长/nm Laser wavelength	903		



A. 扫描路径；B. 点云数据。A. Scan path; B. Point cloud data.

图 1　样地点云数据采集时的扫描路径及点云数据

Fig. 1　Scanning path and the acquired point cloud data at sample plots

1.2.3　样本选取与代表性分析　样本集在树种组成、单木结构参数（胸径、树高）及林分密度等关键因子上，有效代表了研究区白桦天然次生林的典型特征与变异范围。为准确评估基于背包式激光雷达构建单木三维模型及估算单木地上生物量的效果与精度，从 6 块样地中随机选取 60 棵兴安落叶松和 60 棵白桦作为样本木，其胸径与树高等基本信息如表 3 所示。

表 3　验证样本 60 棵兴安落叶松和 60 棵白桦的基本信息

Table 3　Basic information of 60 *Larix gmelinii* and 60 *Betula platyphylla* in the verification sample

树种 Tree species	样本数 Sample size	胸径/cm Diameter at breast height			树高/m Tree height		
		平均值±标准差 Mean±Standard	最小值 Min	最大值 Max	平均值±标准差 Mean±Standard	最小值 Min	最大值 Max
兴安落叶松 *Larix gmelinii*	60	10.4±4.2	5.0	23.2	10.3±3.7	2.1	23.1
白桦 *Betula platyphylla*	60	11.6±5.1	5.8	24.0	13.2±4.8	5.6	25.6

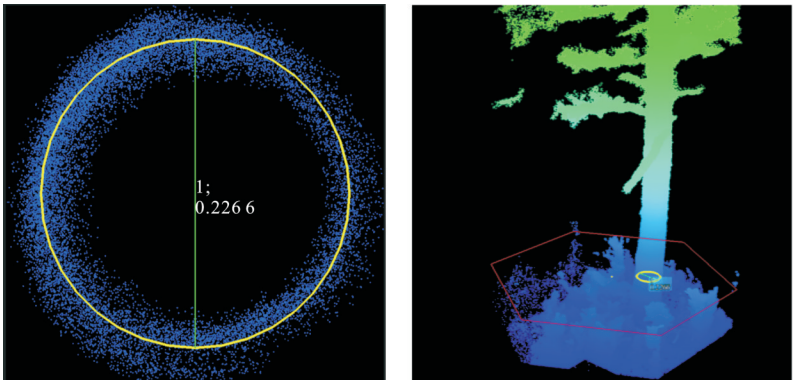
选取的样木中，兴安落叶松的胸径为 5.0～23.2 cm（平均值为 10.4 cm），树高为 2.1～23.1 m（平均值为 10.3 m）；白桦的胸径为 5.8～24.0 cm（平均值为 11.6 cm），树高为 5.6～25.6 m（平均值为 13.2 m）。验证样本可覆盖从小径阶（DBH≈5.0 cm）到中大径阶（DBH≈24.0 cm），以及从幼树到近成熟树（树高 2.1～25.6 m）的完整梯度。样木位于林分密度为 889～2 550 株/hm^2 的多个样地（表 1），涵盖了研究区内从稀疏到稠密的主要林分条件。

1.3　研究方法

1.3.1　点云数据预处理　首先将采集到的源数据轨迹文件导入 LiFUser BP 软件（北京数字绿土有限公司）进行轨迹解算处理。再将解算后的背包式激光雷达点云数据导入 LiDAR360 V8.0 软件，对点云数据进行重采样、去噪、地面点分类和归一化处理[14]。去噪时，先采用高度阈值法消除环境干扰因素导致的样地点云数据的噪声点，随后根据渐进加密三角网滤波算法对其进行地面点分类，再基于地面点分类生成数字高程模型（DEM），最后对点云进行归一化处理，以消除地形起伏对数据的影响[15]。

1.3.2　单木分割及单木因子提取　为获得单木结构参数，需要对所有样地点云数据进行单木分割，即将归一化处理后的点云数据在 LiDAR360 V8.0 软件中进行分割处理，本研究采用基于种子点的单木分割方法。由于自动分割方法得到的单木点云数据容易受到低矮灌木的干扰，并容易将相近的样树分割为同一株树，因此在点云数据中，于单株树的胸高 1.2～1.4 m 处，手动添加种子点，通过拟合

圆的方式拟合胸径(图 2)。并根据种子点的三维坐标聚类搜索提取单木点云如图 2 所示。最后,在单木分割(图 3)完成后对点云异常值再进行手动分割与修正(图 4)。



左图中 1 代表树木编号;0.226 6 代表拟合得到的胸径值,单位为 m。

In the left, 1 represents the tree number; 0.2266 represents the fitted diameter at breast height value, unit is meters.

图 2 基于种子点拟合的单株样木胸径

Fig. 2 Diameter at breast height of individual sample trees based on seed point fitting

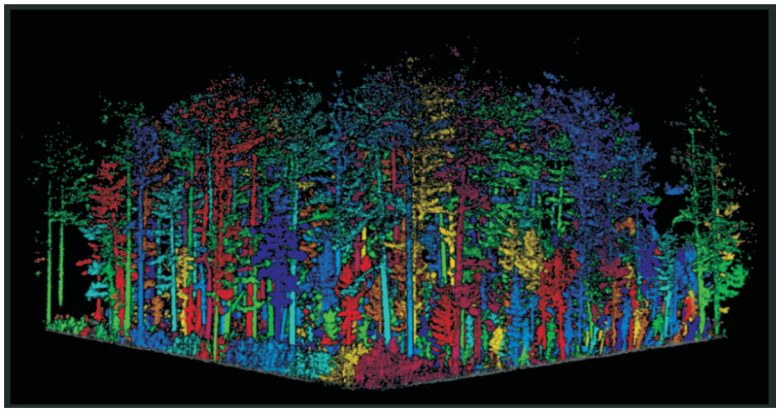
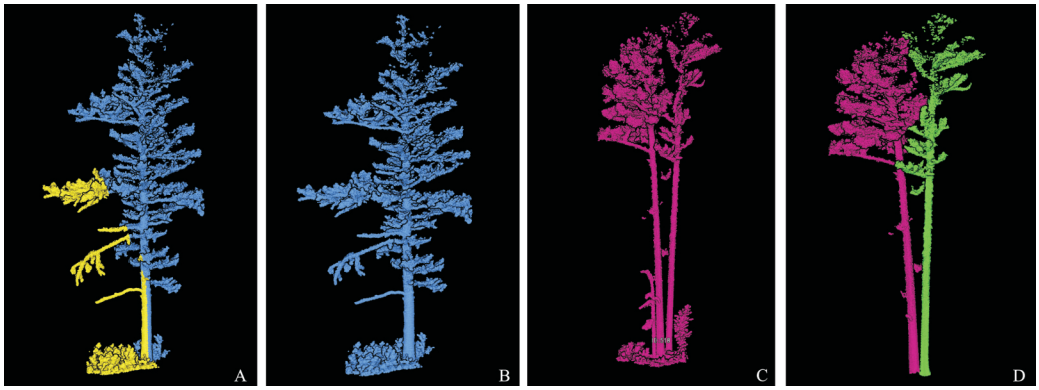


图 3 基于种子点的单木分割

Fig. 3 Individual trees segmentation based on seed points



A. 过分割;C. 欠分割;B 和 D. 修正后。

A. Over-segmentation; C. Under-segmentation; B and D. Post-correction.

图 4 点云异常值手动分割与修正前后对比

Fig. 4 Comparison before and after manual segmentation and correction of point cloud outliers

1.3.3 树木定量结构模型的构建 选取树木定量结构模型(AdQSM)对单木点云进行三维重建。由于背包式激光雷达在林冠下层及主干部分获取的点云数据易产生噪点,导致模型估测单木参数的准确性降低。而 AdQSM 算法可以从不同类型的点云数据中准确重建单木枝干几何结构并且对点云数据的不完整性和噪点具有较好的鲁棒性[10]。此外,针对兴安落叶松、白桦等不同树种的形态差异,可

以通过调整参数获得最优三维重建模型。

AdQSM算法是FAN等[10]对AdTree方法进行了更新和扩展后而提出的一种新的基于点云数据重建单木三维结构的模型。该模型在Adtree研究的基础上，使用最小生成树算法（MST），从输入点云中提取单株树的初始骨架并进行裁剪，采用圆柱体拟合算法对树木的枝干结构进行精确几何重建，最终得到具有详细树木拓扑结构与形态特征的单株树三维定量结构模型，在c++AdQSM程序中完成单株树模型重建（图5）。根据重建的模型自动计算树干和树枝的体积，进一步估算单株树的AGB。

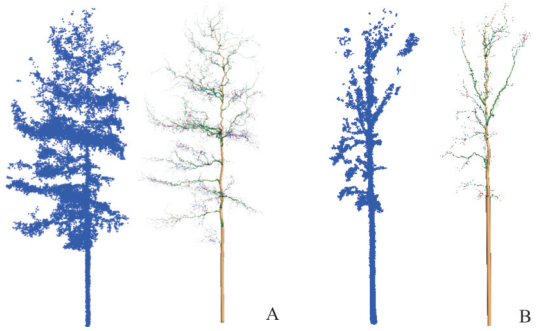


图5　兴安落叶松（A）和白桦（B）单木点云数据（左）及AdQSM重建的单木三维模型（右）

Fig. 5　Individual tree point cloud data（left）and the reconstructed 3D model using AdQSM（right）for *Larix gmelinii*（A）and *Betula platyphylla*（B）

1.3.4　树木定量结构模型参数优化　在AdQSM建模过程中，有2个重要参数，即树干点云数据分割高度（height segmentation，HS）和点云处理过程中的抽稀率（cloud parameter，CP），HS的单位为m。FAN等[10]将参数HS和CP的默认值分别定义为0.5 m和0.003。由于AdQSM建模过程对输入点云密度不敏感，所以将CP设为默认值。树干点云不同分割高度获取的树干初始圆柱体的半径也不同，从而影响树木三维重建的精度[10]。因此，在每个树种中分别选取20棵树，对不同的HS参数值进行测试，以确定适用于每个树种的最优参数值。从不同的HS测试值（0.4，0.5，0.6，0.7，0.8，0.9和1.0 m）中选择适合不同树种的最优参数。首先，使用不同的测试值对单株树进行建模，并提取树的体积。其次，将体积乘以各树种的基本木材密度（ρ）得到单株树的AGB，并与实测数据计算的AGB进行比较。最后，将均方根误差（RMSE）最小值所对应的HS参数值定义为适用于该树种的最优参数。

1.3.5　基于背包式激光雷达的单木地上生物量估算　将基于背包式激光雷达点云数据构建AdQSM模型获取的单木参数，分别采用转换因子法和生物量模型法估算树干、树枝和单木地上生物量。其中转换因子法基于树木材积（或森林蓄积量）与生物量之间的相关关系，通过材积换算生物量，可用于单木与林分等不同尺度的生物量估算。用基本木材密度（ρ）乘以单株树体积估算AGB，树干和树枝部分的生物量约占总生物量的80%～90%，而叶片生物量仅占总生物量的10%[16]。因此，在不考虑叶片生物量的情况下估算包括树干和分枝的生物量。单木地上生物量AGB的估算公式为：

$$AGB = \rho V_b。\tag{1}$$

式中：AGB为单木地上生物量，kg；ρ为特定树种的木材密度，g/cm^3，V_b为通过AdQSM模型估算的单株树体积，m^3。

生物量模型法采用前人已建立的大兴安岭地区兴安落叶松和白桦单株林木各组分生物量回归方程[17]，结合AdQSM模型提取胸径和树高，选择相应的生物量回归方程估算单株树AGB。

基于样地调查数据，以单株林木各组分生物量回归方程计算获得的各器官生物量和地上生物量作为参考值，与基于AdQSM模型重建的单株树三维结构提取参数估算的单木生物量进行对比分析，得到兴安落叶松和白桦对应的生物量回归方程与基本木材密度[18]见表4。

表4　各树种生物量回归方程和基本木材密度值

Table 4　Biomass regression equations and basic wood density values for different tree species

树种 Species	生物量 Biomass	生物量回归方程 Regression equation	基本木材密度（ρ）/（g·cm^{-3}） Wood density
兴安落叶松 *Larix gmelinii*	树干 Trunk	$W=0.062\,3D^{2.558\,1}$	0.498
	树枝 Branch	$W=0.024\,7D^{2.274\,2}$	
	地上 Above ground	$W=0.135\,9D^{2.407\,7}$	
白桦 *Betula platyphylla*	树干 Trunk	$W=0.028\,53(D^2H)^{0.892\,78}$	0.427
	树枝 Branch	$W=0.002\,78(D^2H)^{1.025\,68}$	
	地上 Above ground	$W=0.045\,77(D^2H)^{0.696\,12}$	

注：W表示生物量；D表示胸径；H表示树高。

Note：W denotes biomass；D denotes diameter at breast height；H denotes tree height.

1.3.6 精度评价 为评价基于种子点的单木分割方法的精度,本研究通过将6块样地的单木分割数据与实测数据进行匹配,并统计样地内树木总株数和准确分割(TP)、过分割(FP)、欠分割(FN)的树木株数N_{TP}、N_{FP}、N_{FN},采用准确率(P)、召回率(R)和F分数(F-score,F)进行精度验证。其计算公式如下:

$$P=N_{TP}/(N_{TP}+N_{FP}), \quad (2)$$

$$R=N_{TP}/(N_{TP}+N_{FN}), \quad (3)$$

$$F=2\times P\times R/(P+R)。 \quad (4)$$

以样地实测数据作为参考值,采用2个精度评价指标均方根误差(root mean squared error, RMSE)和决定系数(coefficient of determination,R^2)综合评估背包式激光雷达点云数据中提取胸径和树高的准确性,以及基于AdQSM方法估计AGB的可行性。其计算公式为:

$$R^2=1-\frac{\sum(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum(y_i-\bar{y}_i)^2}, \quad (5)$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum(y_i-\hat{y}_i)^2}{n-1}}。 \quad (6)$$

式中:y_i表示第i株树胸径或树高的实测值,$\hat{y}_i$表示基于点云数据的第i株树胸径或树高的提取值,$\bar{y}_i$表示胸径或树高实测值的平均值,n表示样本数量。

2 结果与分析

2.1 单木分割精度评价及提取胸径和树高的拟合

背包式激光雷达点云数据通过基于种子点单木分割方法提取的单木数据与实测数据进行匹配,得到结果如表5所示。由表5可见,对于6块样地内的1 376株树,准确分割1 252株树,准确率(P)平均值为0.95,召回率(R)平均值为0.97,F分数(F)平均值为0.96,说明基于种子点单木分割方法取得的结果较好。然而,分割精度在不同样地间存一定差异,样地1与样地2的单木株数较少(≤88株),分割精度较高(F≥0.99)。随着样地内单木株数增加,林分结构趋于复杂,如样地3~6,单木株数为164~510株树,分割精度有所下降,其中以样地3的总体精度相对最低(F=0.92)。

表5 不同株数的6块样地单木分割结果与精度评价

Table 5 Individual tree segmentation results and accuracy assessment for the six sample plots

样地号 Plot	株数 Number of trees	N_{TP}	N_{FP}	N_{FN}	P	R	F
1	88	88	0	0	1.00	1.00	1.00
2	80	79	1	0	0.99	1.00	0.99
3	164	139	13	12	0.91	0.92	0.92
4	225	194	22	9	0.90	0.96	0.93
5	309	276	23	10	0.92	0.97	0.94
6	510	476	23	11	0.95	0.98	0.97

注:N_{TP}、N_{FP}、N_{FN}分别表示准确分割、过分割、欠分割的树木株数;P、R、F分别表示准确率、召回率和F分数。

Note: N_{TP}, N_{FP}, and N_{FN} denote the number of trees with accurate-segmentation, over-segmentation, and under segmentation, respectively; P, R, and F represent precision, recall, and F-score.

以样地实测值为参考值,对激光雷达提取的单木结构参数(胸径与树高)的精度进行评价,其回归关系见图6。

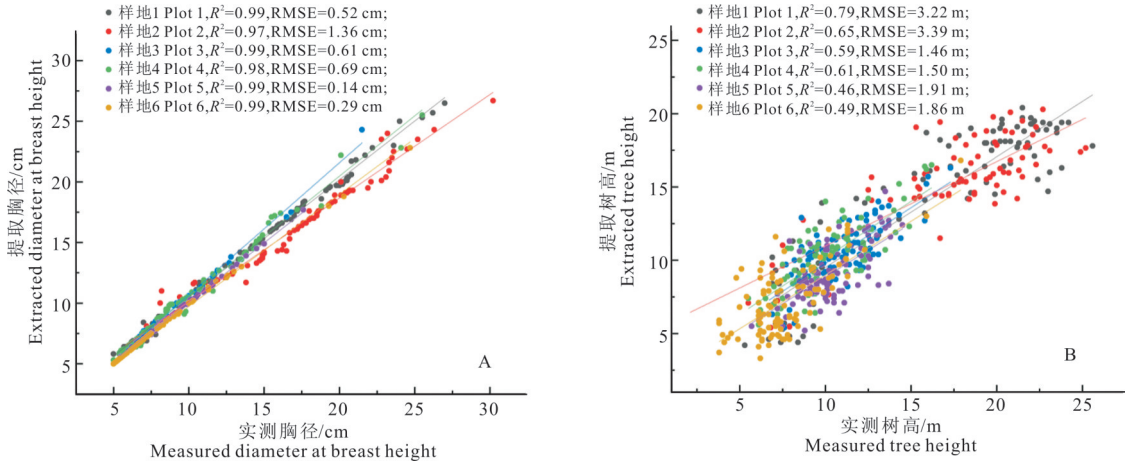


图6 基于背包式激光雷达提取的单木胸径(A)和树高(B)与实测数据的比较

Fig. 6 Comparison of individual trees diameter at breast height (A) and tree height (B) extracted using backpack LiDAR with field-measured data

由图6-A可见,6块样地提取的单木胸径值为5.0~27.0 cm,通过背包式激光雷达提取的单木胸径与实测值具有较高的一致性,激光雷达扫描提取的6块样地单木胸径值的决定系数R^2均大于等于

0.97，最高值可达0.99，但在不同林分密度下差异较为明显；RMSE为0.14～1.36 cm，平均值为0.60 cm，表明背包式激光雷达提取的单木胸径具有一定的可靠性。从图6-B可以看出，背包式激光雷达提取的树高与实测数据的拟合精度较低，6块样地由背包式激光雷达提取树高的R^2最小值为0.46，最大值为0.79，RMSE值为1.46～3.39 m，平均值为2.23 m。这说明在林分密度高、枝叶相互遮挡的天然林环境下，激光雷达难以准确探测到树冠顶部，导致点云数据提取树高的精度较低。

2.2　基于AdQSM模型的参数优化

利用AdQSM模型中不同的HS参数值估算单株树的AGB，并将RMSE最小值对应的参数定义为适用于兴安落叶松和白桦两种树种的最优参数，即点云数据分割高度（HS）。表6为AdQSM模型中不同HS参数值下兴安落叶松和白桦单株AGB的估算结果。由表6可以看出，当HS为0.4 m时，兴安落叶松和白桦重建模型的单株树的AGB精度最高，其RMSE值分别为17.90和12.58 kg/株。因此确定，兴安落叶松和白桦重建模型的最佳参数HS均为0.4 m。

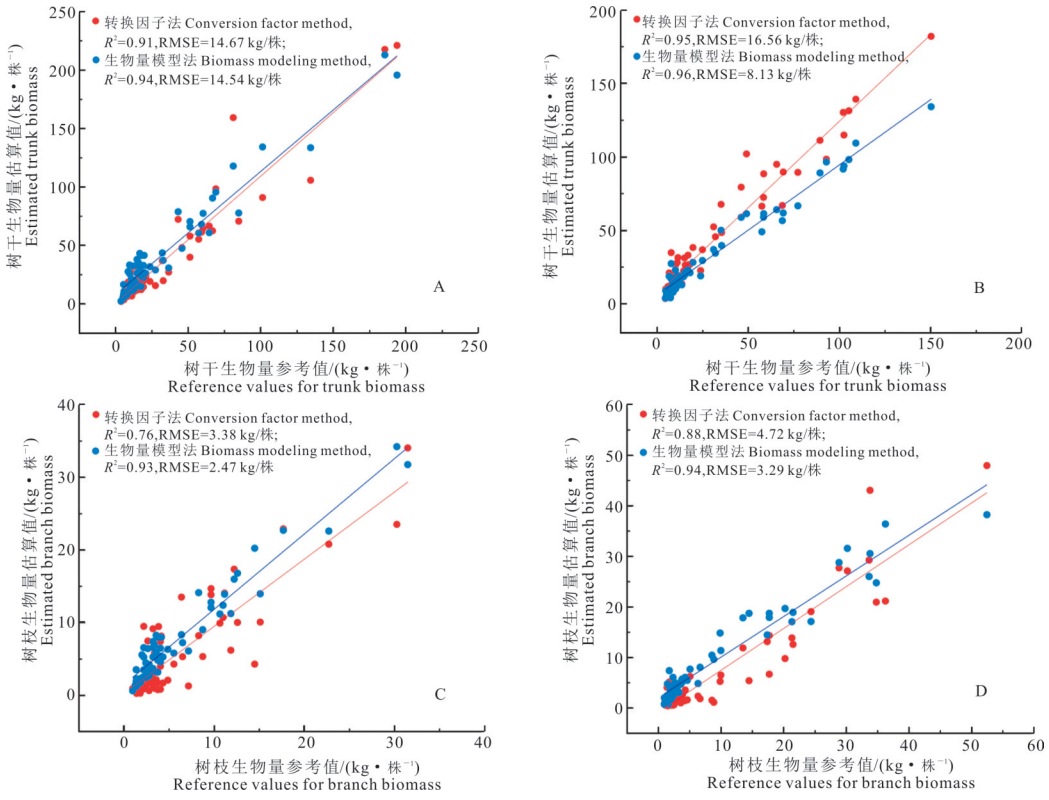
表6　AdQSM模型中不同HS参数下不同树种AGB估算精度（RMSE）的比较

Table 6　Comparison of estimation accuracy (RMSE) in AGB estimation for different tree species under various HS parameters in the AdQSM model　　kg/株

树种 Species	HS/m	RMSES	树种 Species	HS/m	RMSES
兴安落叶松 *Larix gmelinii*	0.4	17.90	白桦 *Betula platyphylla*	0.4	12.58
	0.5	19.68		0.5	15.66
	0.6	39.42		0.6	48.44
	0.7	41.10		0.7	37.30
	0.8	50.38		0.8	35.64
	0.9	47.84		0.9	40.87
	1.0	50.48		1.0	36.89

2.3　地上生物量估算

基于样地调查数据，以单株树木各组分生物量回归方程计算获得的树干、树枝生物量作为参考值，从6块样地中随机选取兴安落叶松和白桦各60棵，对基于背包式激光雷达点云数据构建的AdQSM模型估算的树干、树枝生物量结果进行评价，结果见图7。



A和C分别代表兴安落叶松树干和树枝生物量；B和D分别代表白桦树干和树枝生物量。

A and C represent the biomass of *Larix gmelinii* trunks and branches; B and D represent the biomass of *Betula platyphylla* trunks and branches.

图7　基于转换因子法和生物量模型法的树干和树枝生物量估算结果与参考值的比较

Fig. 7　Comparison of trunk and branch biomass estimates based on conversion factors and biomass modeling methods with reference values

基于转换因子法和生物量模型法对兴安落叶松树干生物量估算值与参考值的拟合结果(图 7-A)表明,两种方法得到的树干生物量估算值与参考值的拟合直线趋势高度相似,散点均紧密分布在拟合线两侧,采用转换因子法估算树干生物量的精度(R^2=0.91,RMSE=14.67 kg/株)略低于生物量模型法(R^2=0.94,RMSE=14.54 kg/株)。对于白桦(图 7-B)而言,采用两种方法估算的树干生物量与参考值拟合直线相差较大,随着树干生物量值的增大,转换因子法估算值相比后者明显被高估,转换因子法得到的白桦树干生物量的R^2为 0.95,RMSE 值为 16.56 kg/株,生物量模型法的R^2为 0.96,RMSE 值为 8.13 kg/株。由图 7-C 可知,基于转换因子法和生物量模型法估算的兴安落叶松树枝生物量的R^2分别为 0.76 和 0.93,RMSE 值分别为 3.38 和 2.47 kg/株,以生物量模型法的估算精度较高。由图 7-D 可知,采用转换因子法估算的白桦树枝生物量的R^2为 0.88,RMSE 值为 4.72 kg/株;生物量模型法估算时的R^2为 0.94,RMSE 值为 3.29 kg/株。白桦树枝生物量估算结果与兴安落叶松树枝生物量估算结果相似,且均以生物量模型法的估算精度高于转换因子法。上述结果表明,基于背包式激光雷达-AdQSM 模型提取单木生物量时,采用转换因子法和生物量模型法均能得到良好的树干生物量估算结果,但对于树枝生物量,转换因子法存在一定的高估现象。基于生物量模型法的树干与树枝生物量估算精度均优于转换因子法。

基于转换因子法和生物量模型法估算的兴安落叶松与白桦 AGB 估算值与参考值的拟合结果如图 8 所示。

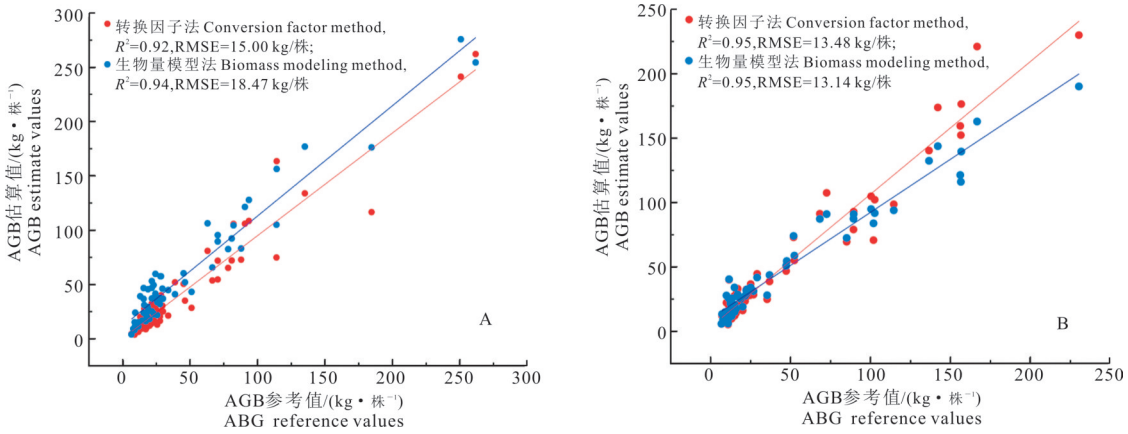


图 8 基于转换因子法和生物量模型法的兴安落叶松(A)和白桦(B)AGB 估算结果与参考值的比较

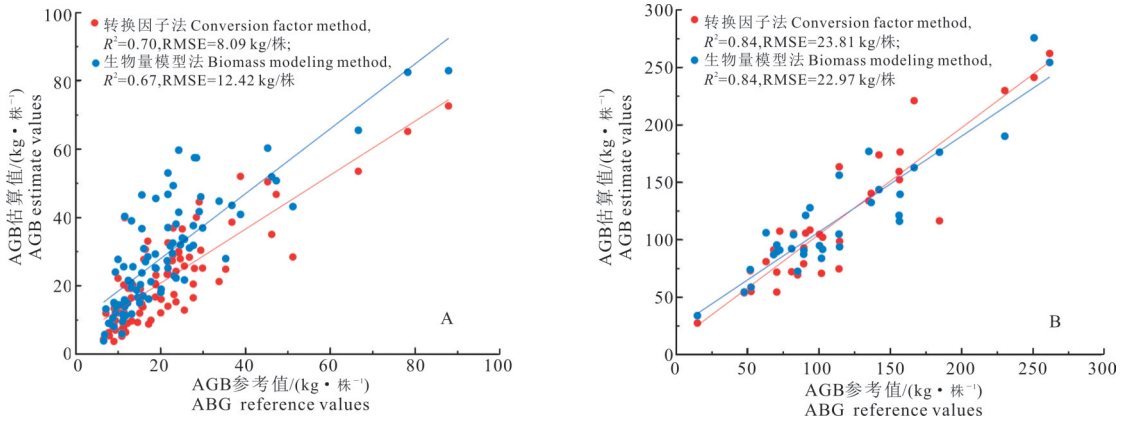
Fig. 8 Comparison of AGB estimates for *Larix gmelinii* (A) and *Betula platyphylla* (B) based on conversion factor method and biomass model method with reference values

图 8 显示,2 种树种单木 AGB 的估测结果与实测数据具有一致性。基于转换因子法估算兴安落叶松单木 AGB 的R^2为 0.92,RMSE 为 15.00 kg/株,估算白桦 AGB 的R^2为 0.95,RMSE 为 13.48 kg/株。采用生物量模型法估算兴安落叶松单木 AGB 的R^2为 0.94,RMSE 为 18.47 kg/株,白桦的R^2为 0.95,RMSE 为 13.14 kg/株。该结果表明,基于背包式激光雷达-AdQSM 模型提取单木参数,采用转换因子法和生物量模型均能得到良好的 AGB 估算结果,兴安落叶松和白桦单株 AGB 与参考值均具有良好的拟合结果。

为进一步分析 AGB 估算误差的来源,分别按胸径、树高和林分密度对样本进行分组评估,得到不同维度的 AGB 估算精度如图 9,10 和 11 所示。图 9-A、B 显示,估算精度随胸径增大而显著提升。对于小径阶(<15 cm)样木(图 9-A),转换因子法与生物量模型法的R^2分别为 0.70 和 0.67,RMSE 分别为 8.09 和 12.42 kg/株。相比之下,对于大径阶(≥15 cm)样木(图 9-B),两种方法的R^2均达到 0.84,且生物量模型法的 RMSE(22.97 kg/株)略优于转换因子法(23.81 kg/株)。这说明胸径是影响 AGB 估算精度的关键因子,且生物量模型法在胸径较大样木上的表现更具优势。

图 10 显示,按不同树高分组估算 AGB 的精度与按不同径阶分组估算的 AGB 高度一致,但低矮样木(树高<11 m)(图 10-A)的估算精度较低,转换因子法与生物量模型法的R^2为 0.73 和 0.72,但生物量模型法的 RMSE 值(13.40 kg/株)高于转换因子法(7.76 kg/株)。对于高大样木(树高≥11 m)(图 10-B),2 种方法的估算精度均达到较高水平,R^2均

大于等于 0.92,且生物量模型法的 RMSE(19.53 kg/株)低于转换因子法(20.82 kg/株)。这进一步证实,单木结构因子(无论是胸径还是树高)是决定 AGB 估算精度的主要因素,体积较大的样木点云结构更完整,模型重建与估算更为可靠。

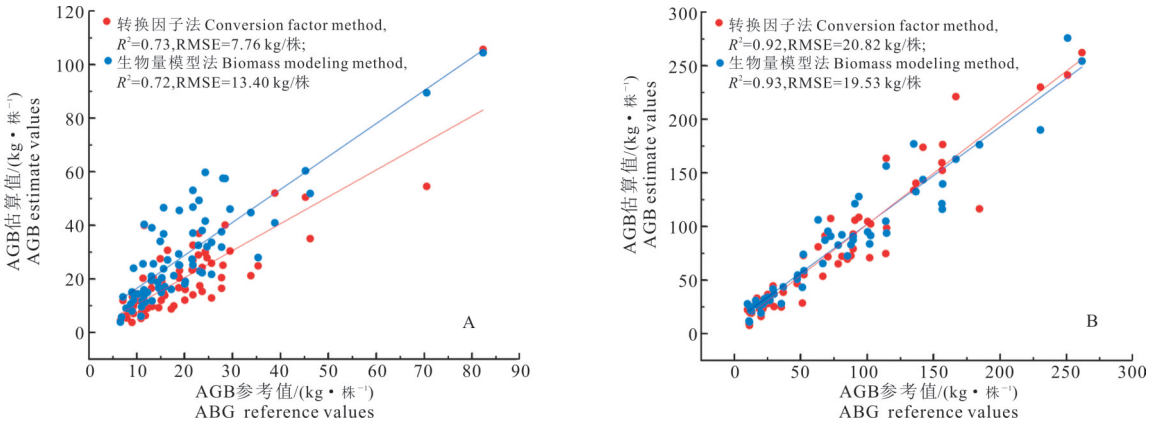


A. 小径阶(胸径<15 cm);B. 大径阶(胸径≥15 cm)。

A. Small-diameter logs (DBH<15 cm); B. Large-diameter logs (DBH≥15 cm).

图 9　不同径阶样木 AGB 估算结果的比较

Fig. 9　Comparison of AGB estimates for sample trees at different diameter classes

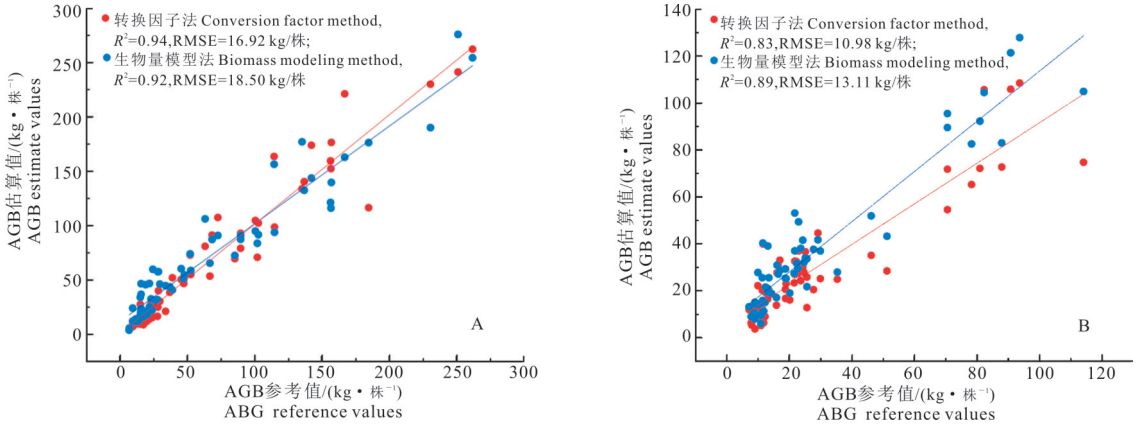


A. 低矮木(树高<11 m);B. 高大木(树高≥11 m)。

A. Low trees (Tree height<11 m); B. Tall trees (Tree height≥11 m).

图 10　不同树高样木 AGB 估算结果的比较

Fig. 10　Comparison of AGB estimates for sample trees at different heights



A. 低密度样地(1,2,5号样地);B. 高密度样地(3,4,6号样地)。

A. Low-density plots (Plots 1,2,5); B. High-density plots (Plots 3,4,6).

图 11　不同林分密度下样木 AGB 估算结果的比较

Fig. 11　Comparison of AGB estimates for sample trees at different stand densities

图11显示,无论在低密度样地(图11-A)还是高密度样地(图11-B),转换因子法的表现均较为稳定,低、高林分密度下的R^2分别为0.94和0.83,RMSE分别16.92和10.98 kg/株。生物量模型法在两种林分密度下的R^2也均大于等于0.89。这表明在不同林分密度上,两种方法估算精度的差异总体上远小于单木结构因子带来的差异。林分密度对AGB估算精度未产生十分显著的影响,这可能是因为单木分割与AdQSM模型的重建流程对不同林分密度环境均有一定的适应性。

3 讨 论

本研究采用背包式激光雷达获取样地点云数据,对点云进行单木分割,提取单木结构参数,并基于AdQSM重建单木三维结构模型,根据重建获取的单木胸径、树高和各器官材积,分别采用转换因子法与生物量模型法估算单木树干、树枝生物量和AGB。背包式激光雷达单木分割总体精度F=0.96,但在单木分割时存在过分割和欠分割的情况,这主要源于样地内树木间距较小、冠层交错严重,导致算法在区分相邻树木时产生过分割与欠分割。因此,为提高三维结构模型构建和单木地上生物量估算精度,手动剔除异常值和修正错误分割的单木可有效避免潜在的误差来源。单木结构参数提取结果表明,样木胸径提取精度较高,树高提取精度相对较低。背包式激光雷达提取6块样地的单木胸径的RMSE为0.14~1.36 cm,其中样地2和4的R^2值均大于等于0.97,平均RMSE为1.02 cm,样地1,3,5和6的R^2较高,为0.99,RMSE均值为0.39 cm,其误差主要与设备本身的测量精度及样地林下灌木层密度较高等有关。背包式激光雷达对6块样地单木树高提取精度的R^2为0.46~0.79,RMSE为1.46~3.39 m。本研究与其他采用背包式激光雷达提取单木结构参数的结果[19-20]基本一致,但低于李馨等[21]利用背包式激光雷达与无人机激光雷达相结合对思茅松树高的提取结果。由此可见,胸径的提取依赖于树干基部点云的完整性和密度,背包式激光雷达通过其灵活的移动扫描模式,可以近距离、多角度地扫描树干下部,有效克服了机载激光雷达易被树冠遮挡的弱点,从而能够精确地拟合树干圆柱体模型并计算直径[22]。与胸径相反,树高提取的精度较低,这主要源于背包式激光雷达的"仰视"视角。扫描仪从林下向上扫描,树冠顶部的点云容易因枝叶遮挡而稀疏甚至缺失,导致树冠顶点识别存在不确定性,从而引入了较大的误差[23],这与机载激光雷达的"俯视"视角在提取树高上的优势形成对比。

在通过AdQSM算法重建单木三维模型过程中,HS(点云分割高度)参数的优化结果表明,对于兴安落叶松和白桦,HS=0.4 m时AGB估算精度最高。HS参数决定了模型将树干分解为多少段来计算体积,直接影响树干形状的模拟精度。当HS值设置过大时,模型可能会忽略树木的一些细小分支和结构特征,导致AGB估算精度下降;HS值过小则可能因点云噪点而产生不稳定的截面拟合,同样会降低AGB估算精度[24]。本研究发现,HS=0.4 m为最优值,说明在此研究区内,0.4 m的高度间隔能够较好地平衡模型对单木结构的识别精度和去噪能力。该结果提示在使用AdQSM时,针对特定树种和点云数据特性进行参数优化是必要且有效的。

本研究利用AdQSM算法构建单木三维模型,提取120株样木胸径、树高和各器官材积,分别采用转换因子法和生物量模型法估算兴安落叶松和白桦生物量。各器官生物量估算结果显示,两种方法中生物量模型法的精度(平均R^2=0.94,RMSE=7.11 kg/株)略高于转换因子法(平均R^2=0.88,RMSE=9.83 kg/株)。其中,白桦、兴安落叶松树干生物量估算时的R^2分别为0.96和0.94,RMSE分别为8.13和14.54 kg/株,白桦、兴安落叶松树树枝生物量估算时的R^2分别为0.94和0.93,RMSE分别为3.29和2.47 kg/株,可见两种树种树干生物量的估算结果明显优于树枝生物量,主要原因是林木冠层较密,树枝相互交叉遮挡降低了背包式激光雷达的点云扫描质量,导致重建AdQSM模型的误差较大。采用两种方法估算AGB的结果显示,基于生物量模型法估算的白桦AGB精度(R^2=0.95,RMSE=13.14 kg/株)略高于兴安落叶松AGB的估算结果(R^2=0.94,RMSE=18.47 kg/株)。在采用AdQSM方法中的最小生成树(MST)算法提取树木骨架时,算法会优先重建一级枝干等主导性拓扑结构,而二级枝干由于从一级结构分生,形态更为细小且数量较多,在点云数据中的几何特征不如一级枝干明显,容易被遮挡或忽略[24]。因此,兴安落叶松树枝的交错生长影响了单株分割的准确性[25],而白桦生物物理形态相对简单,点云数据受分支影响较小,单株AGB估算精度略高于兴安落叶

松。尽管如此，两者R^2均高于0.92，证明了AdQSM方法在AGB估算上的有效性和可靠性。本研究与KIM等[24]的研究结果相似，证实了利用激光雷达点云数据计算树木体积并推导生物量的可行性，避免了传统生物量估算方程带来的误差[26]。此外，与其他建模方法相比，本研究采用的AdQSM也显示出其实用性优势。有研究者基于两种不同移动激光雷达点云，利用TreeQSM构建三维结构模型估算单木地上生物量，其结果（R^2为0.91和0.95）虽与本研究精度相近，然而TreeQSM模型的参数优化过程通常需要消耗大量计算资源，且单个模型的建立效率低于AdQSM[27]。因此，AdQSM方法在确保精度的前提下，提升了三维重建效率并降低了计算成本。

本研究进一步分析了不同维度（胸径、树高、林分密度）下AGB估算精度的误差来源。结果表明，样木胸径和树高值的大小是AGB估算误差的主要来源，其影响远大于样地林分密度。两种估算方法中生物量模型法对小径阶和低矮样木的估算精度低于转换因子法，相反其对大径阶和高大样木的估算精度较高。转换因子法虽稳健性较好，但对大径阶样木的估算有低估现象。同时，两种方法在高林分密度样地中的估算误差大于低密度样地，其原因可能是因为小树和密度较高的样地中点云完整性较差，以及枝干特征不明显、冠层交叉严重导致从点云中提取的胸径、冠幅等参数存在较大误差。整体而言，在大径阶、高大样木和两种不同林分密度样地采用两种估算方法均能获取准确的AGB估算结果（R^2为0.83～0.94），而小径木与低矮木使用转换因子法更优。

在本研究中，影响森林AGB估算精度的误差来源主要有二：其一是本研究中复杂的树冠形态导致激光信号在树冠顶部的点云扫描质量较差，从而影响树高和冠层点云数据的准确性，并对单株树地上生物量的估算产生一定影响；第二是本研究主要针对兴安落叶松和白桦两种树种，虽然结果积极，但样本量和树种的多样性仍存在局限。由于不同树种的生物物理和形态结构不同，AdQSM单株树建模中设置的参数也不同，导致不同树种单木重建过程的灵敏度和鲁棒性存在差异。针对上述问题，未来的研究应在更多样化的森林环境中测试背包式激光雷达的潜力，探索其可以检测到的森林高度上限，以及利用背包式激光雷达与无人机机载雷达数据融合技术提高树高提取精度的可行性。此外，应增加更多树种、更大范围的林分条件和更多样化的林龄结构来进行研究，以优化AdQSM参数，进一步提高基于背包式激光雷达点云数据的单木体积提取和AGB的估算精度。

4　结　论

以内蒙古大兴安岭白桦天然次生林中的优势树种兴安落叶松与白桦为研究对象，采用背包式激光雷达获取点云数据，提取单木结构参数，并基于AdQSM模型提取的单木胸径、树高、树干材积及树枝材积，分别采用转换因子法与生物量模型法估算单木各器官生物量和AGB。

1）背包式激光雷达可以有效获取单木结构参数，其中提取的胸径与实测数据拟合精度较高，提取树高与实测数据拟合精度较低。在以后研究中，可以结合机载激光雷达扫描提取冠层信息，利用数据融合技术提高单木结构参数的提取精度。

2）利用兴安落叶松和白桦两种树种的单株样木点云数据，对AdQSM重建模型中的HS参数进行优化，通过对不同参数值的测试，确定HS＝0.4 m为适用于兴安落叶松和白桦2种树种的最优参数值。因此，在使用AdQSM方法时，针对特定树种和点云数据特性进行参数优化是必要且有效的。

3）利用AdQSM构建背包式激光雷达点云数据单木三维结构模型，提取单木体积并估算AGB，与利用实测数据获得的单株树生物量拟合回归方程计算的AGB具有良好的一致性，R^2均在0.92以上，表明基于背包式激光雷达点云数据可实现单木AGB的精准估测。本研究结果可为森林地上生物量无损、高效、准确计测提供参考。

[参考文献]

[1] 王萍. 森林碳循环模型概述[J]. 应用生态学报，2009，20(6)：1505-1510.
WANG P. Forest carbon cycle model: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2009，20(6)：1505-1510.

[2] 孔雷，岳刚，吴落军，等. 拉绳式电子测径尺的研发及其测径效果分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(1)：84-93.
KONG L，YUE G，WU L J，et al. Development and verification of a tree-diameter dendrometer based on draw-wire sensor[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Edi)，2023，51(1)：84-93.

[3] 黄华国. 激光雷达技术在林业科学研究中的进展分析[J]. 北京林业大学学报，2013，35(4)：134-143.

HUANG H G. Progress analysis of lidar research on forestry science studies[J]. Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 134-143.

[4] HYYPPA E, YU X W, KAARTINEN H, et al. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3327.

[5] LU J B, WANG H, QIN S H, et al. Estimation of aboveground biomass of Robinia pseudoacacia forest in the Yellow River delta based on UAV and backpack lidar point clouds[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2019, 86: 102014.

[6] DISNEY M, HOLOPAINEN M, VASTARANTA M, et al. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data[J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 491-520.

[7] MOORTHY K M S, RAUMOEN P, BULCKE D V J, et al. Terrestrial laser scanning for non-destructive estimates of liana stem biomass[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 456: 117751.

[8] TANAGO D G J, LAU A, BARTHOLOMEUS H, et al. Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial lidar[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(2): 223-234.

[9] DU S, LINDENBERGH R, LEDOUX H, et al. AdTree: accurate, detailed, and automatic modelling of laser-scanned trees [J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 2074.

[10] FAN G P, NAN L L, DONG Y Q, et al. AdQSM: a new method for estimating above-ground biomass from TLS point clouds[J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 3089.

[11] DONG Y Q, FAN G P, ZHOU Z W, et al. Low cost automatic reconstruction of tree structure by AdQSM with terrestrial close-range photogrammetry[J]. Forests, 2021, 12(8): 1020.

[12] 张俪予,张军辉,张蕾,等. 兴安落叶松和白桦细根形态对环境变化的响应[J]. 北京林业大学学报,2019,41(6):15-23.
ZHANG L Y, ZHANG J H, ZHANG L, et al. Response of fine root morphology of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* to environmental changes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 15-23.

[13] 黄旭,贾炜玮,王强,等. 背包式激光雷达的落叶松单木因子提取[J]. 森林工程,2019,35(4):14-21.
HUANG X, JIA W W, WANG Q, et al. Study on individual tree factor extraction of *Larix olgensis* in backpack lidar[J]. Forest Engineering, 2019, 35(4): 14-21.

[14] LI L W, WEI L J, LI N, et al. Extracting the DBH of moso bamboo forests using lidar: parameter optimization and accuracy evaluation[J]. Forests, 2024, 15(5): 804.

[15] HU T, SUN Y M, JIA W W, et al. Study on the estimation of forest volume based on multi-source data[J]. Sensors, 2021, 21(23): 7796.

[16] CHEN S L, FENG Z K, CHEN P P, et al. Nondestructive estimation of the above-ground biomass of multiple tree species in boreal forests of China using terrestrial laser scanning[J]. Forests, 2019, 10(11): 936.

[17] 王飞. 兴安落叶松天然林碳密度与碳平衡研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
WANG F. Research on the carbon density and carbon balance of *Larix gmelinii* forest[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.

[18] 孟盛旺. 大兴安岭主要树种地上生物量研究[D]. 北京:北京林业大学,2018.
MENG S W. The aboveground biomass of the main tree species in Daxing'anling mountains[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[19] CHEN C, ZHOU L, LI X J, et al. Optimizing the spatial structure of metasequoia plantation forest based on UAV-lidar and backpack-lidar[J]. Remote Sensing, 2023, 15(16): 4090.

[20] XIE Y Y, ZHANG J, CHEN X W, et al. Accuracy assessment and error analysis for diameter at breast height measurement of trees obtained using a novel backpack lidar system[J]. Forest Ecosystems, 2020, 7(3): 421-431.

[21] 李馨,岳彩荣,罗洪斌,等. 应用背包和无人机LiDAR数据对森林地上生物量估测[J]. 东北林业大学学报,2025,53(2):105-113.
LI X, YUE C R, LUO H B, et al. Estimation of forest aboveground biomass using backpack and UAV lidar data[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(2): 105-113.

[22] LIANG X L, VILLE K K, HYYPPA J H, et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115: 63-77.

[23] PHIL W, ALVARO L, MATHIAS D, et al. Data acquisition considerations for terrestrial laser scanning of forest plots[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 196: 140-153.

[24] KIM C, GLENN N, ANDREW B, et al. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2015, 6(2): 198-208.

[25] DISNEY M. Terrestrial lidar: a three-dimensional revolution in how we look at trees[J]. The New phytologist, 2019, 222(4): 1736-1741.

[26] JUCKER T, JOHN C, CHAVE J, et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes[J]. Global change biology, 2017, 23(1): 177-190.

[27] 张怡颖,高洋,苹晓玥,等. 基于移动LiDAR和TLS的单木地上生物量估算对比研究[J]. 山东林业科技,2025,(3):41-50,63.
ZHANG Y Y, GAO Y, SHEN X Y, et al. Comparative study on individual tree, aboveground biomass estimation based on terrestrial laser scanning and mobile LiDAR [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2025, (3): 41-50, 63.

(责任编辑:温晓平)