北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

融合无人机与地面激光雷达点云的杉木单木参数提取：林龄依赖的精度制约与机理解释

蔡健玮 秦馨悦 程威豪 郭维鹏 胡志鹏 蔡明辉 何宗明 侯晓龙 张厚喜

Individual tree parameter extraction of Chinese fir via fusion of UAV and terrestrial LiDAR point clouds: age-dependent accuracy constraints and mechanistic explanation

Cai Jianwei, Qin Xinyue, Cheng Weihao, Guo Weipeng, Hu Zhipeng, Cai Minghui, He Zongming, Hou Xiaolong, Zhang Houxi

引用本文:
蔡健玮, 秦馨悦, 程威豪, 郭维鹏, 胡志鹏, 蔡明辉, 何宗明, 侯晓龙, 张厚喜. 融合无人机与地面激光雷达点云的杉木单木参数提取：林龄依赖的精度制约与机理解释[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):154–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250369
Cai Jianwei, Qin Xinyue, Cheng Weihao, Guo Weipeng, Hu Zhipeng, Cai Minghui, He Zongming, Hou Xiaolong, Zhang Houxi. Individual tree parameter extraction of Chinese fir via fusion of UAV and terrestrial LiDAR point clouds: age–dependent accuracy constraints and mechanistic explanation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):154–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250369

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250369

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于无人机激光雷达点云数据估算红树林覆盖度
Estimating mangrove forest coverage based on unmanned aerial vehicle (UAV) LiDAR point cloud data
北京林业大学学报, 2025, 47(2): 143–151. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240185

基于无人机激光雷达的人工林碳储量线性与非线性估测模型比较
Comparison in linear and nonlinear estimation models of carbon storage of plantations based on UAV LiDAR
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 9–16. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200417

基于无人机激光雷达的天然林林隙识别
Forest gap identification in natural forest based on UAV LiDAR
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 44–53. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210524

激光雷达辅助的样地调查单木定位
LiDAR based individual tree localization for sample plot inventory
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 99–108. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220106

移动式激光雷达在人工林样地调查中的路径规划方法
Path planning method of mobile lidar in plantation sample plot survey
北京林业大学学报, 2024, 46(5): 154–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220273

基于手持激光雷达的人工侧柏纯林冠层空间互补性
Spatial complementarity of canopy layer in pure *Platycladus orientalis* plantations based on handheld mobile laser scanning
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 61–73. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240351

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250369

融合无人机与地面激光雷达点云的杉木单木参数提取：林龄依赖的精度制约与机理解释

蔡健玮[1,2]　秦馨悦[1]　程威豪[2]　郭维鹏[1]　胡志鹏[1]　蔡明辉[1,2]
何宗明[1]　侯晓龙[1]　张厚喜[1,3]
（1. 福建农林大学林学院，福建 福州 350002；2. 福建农林大学菌草与生态学院，福建 福州 350002；
3. 福建长汀红壤丘陵生态系统国家定位观测研究站，福建 福州 350002）

摘要：【目的】森林结构随林龄的动态演变会导致激光雷达（LiDAR）参数提取精度产生异质性。当前单一机载（ALS）或地基（TLS）激光雷达在获取林分垂直三维信息时均存在物理视角局限，而多源点云融合虽能提升精度，但其增益效果如何受林分生长过程的系统性制约，内在物理机制尚不明确。为此，本研究以不同林龄阶段的杉木人工林为对象，系统评估 ALS 与 TLS 融合点云对单木参数（树高、胸径）提取精度的林龄制约规律，并定量解析其底层物理驱动机制，旨在为构建适用于全生长周期的高精度、自适应森林监测体系提供理论与方法支撑。**【方法】**在 9 块不同林龄（幼、中、成熟林）的杉木标准地，同步获取 ALS、TLS 点云及人工实测单木数据。采用无标靶策略对多源点云进行高精度配准与去噪、归一化等预处理后，利用比较最短路径算法对融合点云进行单木分割及树高、胸径提取。通过与实测数据及单一平台结果对比，采用均方根误差（RMSE）、决定系数（R^2）等指标综合评价提取精度。在此基础上，进一步利用广义加性模型定量检验点云核心物理特征与参数提取误差之间的非线性关联，以解析误差演变的底层物理机制。**【结果】**（1）融合点云显著提升了单木几何表征精度，其单木分割 F_1 分数（≥0.961）与高密度 TLS 相当，远优于单一 ALS（≥0.726）。（2）树高提取方面，融合点云在各林龄组均表现最优，相较于单一 ALS 和 TLS，其 R^2 分别平均提升了 0.11 和 0.10；RMSE 较 TLS 降低了 0.197 m，有效修正了地基扫描易低估树高的系统性偏差。（3）胸径提取精度的提升具有显著的林龄依赖性：在幼、中龄林中，多源融合能有效校正底层的几何误差（RMSE 分别降至 0.69 和 1.73 cm）；但在高郁闭度的成熟林中，因林下有效信号缺失，融合对胸径的精度补偿效应基本消失。（4）误差机理分析表明，树高提取残差与点云最大反射强度在中、成熟林中呈极显著的非线性相关（$p \leqslant 0.001$），证实高郁闭度引发的光束散射与物理退化是导致系统性测量偏差的主要原因；而胸径提取偏差则未表现出与宏观结构特征的显著相关性，趋于随机分布。**【结论】**融合 ALS 与 TLS 激光雷达能有效整合冠层与林下探测优势，显著提升杉木单木参数提取的整体精度。然而，这种精度提升受林分结构演变的严格制约，不区分郁闭度差异的简单点云融合在面对茂密林分时，会因激光穿透受限而难以发挥数据的协同优势。林分发育驱动的物理结构演变构成了参数提取系统误差的底层机制，未来研究需探索“林龄/密度自适应”的动态融合策略，并引入基于点云强度的信号衰减补偿模型，以实现在复杂森林生境下的精准反演。

关键词：无人机激光雷达；地基激光雷达；点云融合；杉木人工林；林龄效应；广义加性模型；精度评估
中图分类号：S771.8　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)08−0154−12
引文格式：蔡健玮，秦馨悦，程威豪，等. 融合无人机与地面激光雷达点云的杉木单木参数提取：林龄依赖的精度制约与机理解释［J］. 北京林业大学学报，2026，48(8)：154−165. Cai Jianwei, Qin Xinyue, Cheng Weihao, et al. Individual tree parameter extraction of Chinese fir via fusion of UAV and terrestrial LiDAR point clouds: age-dependent accuracy constraints and mechanistic explanation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 154−165.

收稿日期：2025−09−22　**修回日期：**2025−10−12
基金项目：国家自然科学基金项目（31901298），十四五国家重点研发计划（2023YFF130440502），福建省自然科学基金项目（2021J01059），福建农林大学学生科研创新训练项目（202510389184）。

第一作者：蔡健玮。主要研究方向：植物地理学。Email：tsaijianwei@fafu.edu.cn　地址：350002 福建省福州市仓山区建新镇福建农林大学金山校区林学院。
责任作者：张厚喜，副教授。主要研究方向：无人机遥感，森林土壤碳循环。Email：zhanghouxi@fafu.edu.cn　地址：同上。

本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Individual tree parameter extraction of Chinese fir via fusion of UAV and terrestrial LiDAR point clouds: age-dependent accuracy constraints and mechanistic explanation

Cai Jianwei[1,2]　Qin Xinyue[1]　Cheng Weihao[2]　Guo Weipeng[1]　Hu Zhipeng[1]　Cai Minghui[1,2]
He Zongming[1]　Hou Xiaolong[1]　Zhang Houxi[1,3]

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. College of JunCao Science and Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. National Positioning Observation and Research Station of Red Soil Hill Ecosystem in Changting, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: [**Objective**] The dynamic evolution of forest structure with stand age leads to heterogeneity in the accuracy of LiDAR parameter extraction. Currently, both airborne (ALS) and ground-based (TLS) LiDAR systems face physical viewing angle limitations when acquiring vertical 3D information of forest stands. While multi-source point cloud fusion can improve accuracy, the extent to which this enhances accuracy is systematically constrained by the forest stand growth process, and the underlying physical mechanisms remain unclear. Therefore, this study investigated Chinese fir plantations at different age stages to systematically evaluate the age-dependent patterns of accuracy in extracting individual tree parameters (tree height and diameter at breast height) from fused ALS and TLS point clouds, and to quantitatively analyze the underlying physical driving mechanisms. The aim is to provide theoretical and methodological support for the development of a high-precision, adaptive forest monitoring system applicable to the entire growth cycle. [**Method**] In nine standard plots of Chinese fir of different ages (young, middle-aged, and mature), ALS and TLS point clouds as well as manually measured individual tree data were collected simultaneously. After performing high-precision registration, denoising, and normalization of the multi-source point clouds using a target-free strategy, the fused point cloud was segmented into individual trees, and tree height and diameter at breast height (DBH) were extracted using the comparative shortest path algorithm. Extraction accuracy was comprehensively evaluated using metrics such as root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) through comparison with field measurements and results from a single-platform approach. Building on this, a generalized additive model was further employed to quantitatively examine the nonlinear relationship between the core physical characteristics of the point clouds and extraction errors, thereby elucidating the underlying physical mechanisms driving error evolution. [**Result**] (1) The fused point cloud significantly improved the accuracy of individual tree geometric characterization; its F_1 score for individual tree segmentation ($\geqslant$0.961) was comparable to that of high-density TLS and far superior to that of ALS alone ($\geqslant$0.726). (2) Regarding tree height estimation, the fused point cloud performed best across all age classes. Compared to standalone ALS and TLS, its R^2 values increased by an average of 0.11 and 0.10, respectively, while the RMSE was reduced by 0.197 m compared to TLS, effectively correcting the systematic bias of ground-based scanning that tends to underestimate tree height. (3) The improvement in DBH extraction accuracy exhibits significant age-dependence: in young and middle-aged forests, multi-source fusion effectively corrects underlying geometric errors (RMSE reduced to 0.69 cm and 1.73 cm, respectively); however, in mature forests with high canopy closure, the accuracy-compensating effect of fusion largely disappears due to the lack of effective signals beneath the canopy. (4) Analysis of error mechanisms indicates that tree height extraction residuals exhibit a highly significant nonlinear correlation ($p \leqslant 0.001$) with maximum point cloud reflectance in middle-aged and mature forests, confirming that beam scattering and physical degradation caused by high canopy closure are the primary sources of systematic measurement bias; in contrast, diameter at breast height (DBH) extraction errors do not show a significant correlation with macrostructural features and tend to follow a random distribution. [**Conclusion**] The integration of airborne and terrestrial LiDAR effectively combines the advantages of canopy and understory detection, significantly improving the overall accuracy of individual tree parameter

extraction for Chinese fir. However, this improvement in accuracy is strictly constrained by stand structure evolution; simple point cloud fusion that does not distinguish between differences in canopy closure struggles to leverage the synergistic advantages of the data in dense stands due to limited laser penetration. The physical structural evolution driven by stand development constitutes the underlying mechanism of systematic errors in parameter extraction. Future research should explore "age/density-adaptive" dynamic fusion strategies and introduce signal attenuation compensation models based on point cloud intensity to achieve accurate inversion in complex forest habitats.

Key words: UAV-LiDAR; terrestrial laser scanning; point cloud fusion; Chinese fir plantation; stand age effect; generalized additive model; accuracy assessment

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方重要的速生用材树种[1],在木材生产、碳汇固存与生态功能维持中发挥关键作用。树高和胸径作为表征杉木生长状况的核心指标,其精准提取是资源评估与经营决策的重要基础[2]。尽管激光雷达(Light Detection and Ranging,LiDAR)凭借高分辨率三维结构获取能力已成为森林资源调查的前沿技术,但单一观测平台仍面临固有的物理视角局限:机载激光雷达(Airborne Laser Scan,ALS)适于探测广域冠层结构[3],但其林下点云相对稀疏,导致构建的数字地形模型(Digital Terrain Model,DTM)精度不足,进而影响基于"冠顶高–地面高"的树高估算,且难以直接测算胸径[4];地基激光雷达(Terrestrial Laser Scan,TLS)能获取高精度的树干与胸径信息,但极易受自身或邻近林木遮挡,导致树高常出现系统性低估[5]。多源点云数据(ALS-TLS)融合凭借视角的互补性,被认为是突破单平台局限、构建完整三维林分结构的有效路径。

然而,现有融合研究大多集中于林分结构简单、林下通视条件良好的阔叶林[6]或稀疏针叶林[7]。森林是一个动态生长的复杂系统,林龄的演变本质上驱动了空间结构的异质性。对于高密度种植的杉木人工林而言,其从幼林期向中龄期、成熟期演变的过程中,冠层急剧致密化导致林下通视性显著下降[8]。这种由林龄驱动的结构变化会直接削弱激光信号的穿透与互补交通,可能迫使测量误差从随机波动转变为受物理结构制约的系统性偏差[9]。目前,针对杉木林龄演变如何制约多源点云特征表达及最终单木参数提取精度的深层物理机制,仍缺乏系统性、定量化的科学评估。

除了林分结构的复杂性,点云配准是数据融合的前置关键环节和核心挑战,对后续参数提取精度具有决定性影响。在复杂郁闭的林下环境中,卫星定位信号极易被遮挡[7]和产生多径效应[10],而传统物理标靶布设困难[11],致使依赖这两种手段的点云配准策略在大规模化应用中严重受限。同时,经典的ICP(Iterative Closest Point)算法不仅对初始姿态依赖性强,在非结构化森林场景中易陷入局部最优且计算量庞大[12]。开发摆脱物理标靶与卫星定位依赖的稳健配准策略,是点云融合落地应用的核心瓶颈。

鉴于此,本研究以福建典型杉木人工林为对象,构建集数据采集、高精度配准、单木分割和参数提取为一体的融合框架。通过在幼、中、成熟林中的系统验证,旨在阐明以下核心科学问题:(1)在缺乏物理标靶和地理坐标的条件下,特征驱动的无标靶配准策略能否在高度遮挡的林分中维持空间一致性;(2)林分结构的演变如何制约 ALS-TLS 融合对单木参数提取的精度增益,不同生长阶段的提取误差存在怎样的物理驱动机制。本研究旨在揭示林龄对多源点云提取精度的制约机理,以期为高密度人工林全生长周期的精准监测提供技术与理论支撑。

1 研究区域与数据来源

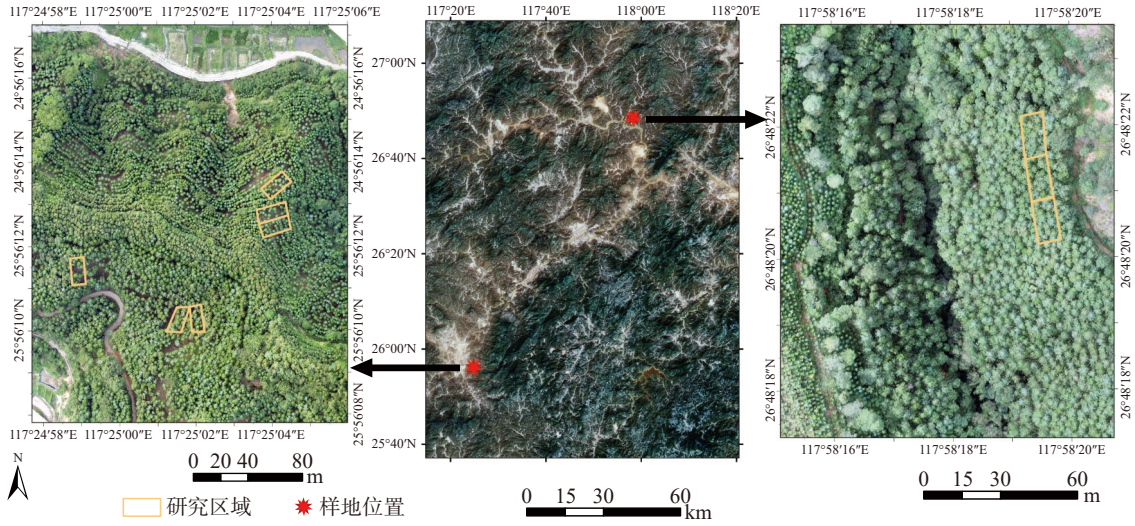
1.1 研究区域概况

本研究选取福建省永安市和南平市典型杉木人工林为研究区,样地分布如图 1 所示,样地实景如图 2 所示。永安市样地位于永浆村(25°56′12″N,117°25′02″E),平均海拔约 600 m,地形以丘陵为主,属中亚热带海洋性季风气候,年降水量 1 500 ~ 1 900 mm,年平均气温 15 ~ 20 ℃,年均无霜期为 306 d,平均日照时数为 1 624.9 h。永安地区杉木种植历史悠久,尤以低山丘陵区为主,是典型的杉木主产区[13]。南平市样地位于峡阳镇(26°48′22″N,117°58′19″E),年平均气温 17 ~ 21 ℃,年降雨量 1 400 ~ 2 000 mm,森林覆盖率 78.89%,是中国南方主要林区,杉木经营历史悠久[14]。永安市和南平市杉木资源丰富,具有代表性强、林龄分布合理等特点,是开展单木参数提取研究的理想试验区。

1.2 数据采集

1.2.1 实地人工测量数据

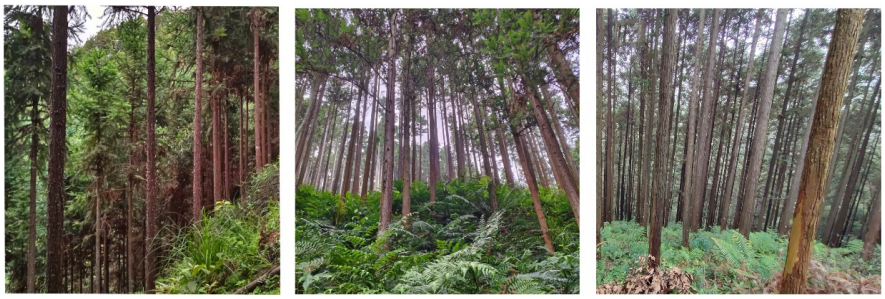
根据林龄将研究区划分为幼龄林(7 年生)、中龄林(14 年生)和成熟林(26 年生)样地,各选取 3 块



a 永安市样地　　b 研究区域 GF-6 宽幅成像仪影像　　c 南平市样地

图 1　研究区域的正射影像与卫星影像

Fig. 1　Orthomosaic and satellite imagery of the study area



a 幼龄林　　b 中龄林　　c 成熟林

图 2　本研究样地环境照片

Fig. 2　Photographs of study site environments

标准地，总计 9 块样地，样地面积约 200 m^2（10 m × 20 m）基本信息见表 1。数据采集于 2023 年 7 月和 2023 年 12 月，分别对应幼龄林/中龄林和成熟林样地。胸径采用围径尺测量，树高使用 Vertex Ⅳ超声测高仪（Haglöf Sweden AB，瑞典）获取；利用 RTK（Real Time Kinematic）系统记录单株空间位置（测量定位误差水平方向 ≤ 0.2 m，垂直方向 ≤ 0.3 m）。

1.2.2　ALS 与 TLS 数据

激光雷达扫描路径如图 3 所示，ALS 点云数据采集采用大疆 M300 RTK 无人机搭载禅思 L1 激光雷达系统（深圳大疆创新科技有限公司，中国），在晴朗微风天气下进行。飞行高度设为 50m，采用“S”形

表 1　研究样地基本概况

Tab. 1　Basic information of plots

样地	林龄/a	龄组	坡向	平均坡度	郁闭度/%	平均树高/m	平均胸径/cm	研究区
1			东	33°	57			
2	7	幼龄林	东	38°	70	14.45 ± 2.22	8.99 ± 1.11	永安
3			北	23°	66			
4			南	40°	64			
5	14	中龄林	西北	35°	78	17.75 ± 2.19	20.74 ± 4.49	永安
6			西北	35°	74			
7			西	36°	98			
8	26	成熟林	西	38°	98	21.58 ± 2.44	25.98 ± 4.28	南平
9			西	36°	97			

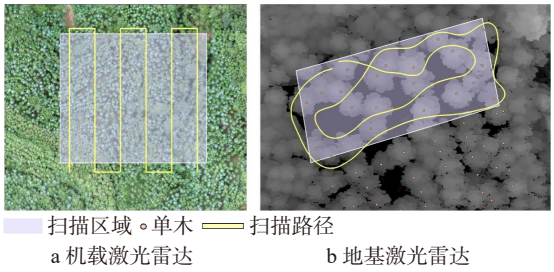


图 3 激光雷达扫描路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of lidar scanning path

航线和仿地飞行模式扫描样地，LiDAR 扫描视角为垂直向下。任务规划通过 DJI Pilot 软件完成，飞行区域由 Mapbox 高分影像辅助确定，后处理使用大疆智图 3.7.3(深圳大疆创新科技有限公司，中国)软件生成 ALS 点云数据。

TLS 点云数据采集使用 GoSLAM RS100s 激光扫描仪(北京天擎智造航空科技有限公司，中国)，扫描方式为环绕样地一周式移动扫描，确保样地内树木 360°覆盖并保持扫描路径匀速、连续，避免点云密度不均。扫描结束时，返回扫描起点，以提高同时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping，SLAM)的成功率和解算精度。通过点云分类和统计发现，随着林龄和郁闭度提升，ALS 点云中地面点比例下降，而 TLS 点云中则保持稳定。

2 研究方法

本研究分别提取 ALS 点云、TLS 点云以及 ALS 和 TLS 融合点云中的单木树高、冠幅和胸径，并以人工实测结果为基准，对单木参数提取结果进行验证。数据处理流程如图 4 所示。

2.1 点云融合

由于 ALS 点云具有投影坐标系，而 TLS 点云无全局定位信息，故选用 ALS 作为基准进行配准。本研究采用无标靶配准策略，通过目视解译确定两平台中同名特征点，并借助 RealWorks 12.0 软件(Trimble Inc.，英国)执行单点配准操作。单点配准在抽稀点云上，使用双阶段方法配准点云，首先通过特征提取与特征匹配以大致对齐点云的初始姿态，再使用精配准对齐点云，以实现无标靶情况下的快速点云配准。为验证配准精度，还采用点云智绘·云图 4.3 软件(武汉点云智绘科技有限公司，湖北，武汉)对点云进行粗配准和基于 ICP 算法[12]的精配准，并对两种配准精度进行对比分析。

2.2 点云预处理

经统计离群点去除(statistical outlier removal，SOR)滤波器降噪后，将点云导入 ArcGIS Pro 3.0.0 软件(Environmental Systems Research Institute，Inc.，美国)，使用“分类 LAS 地面”工具(标准分类)提取点云数据中的地面点，并利用克里金插值法生成 0.05 m 分辨率的 DTM。随后使用 WhiteboxTools Open Core 2.3.0 软件(Whitebox Geospatial Inc.，加拿大)进行点云归一化处理，确保树高估算的参考地面一致。

2.3 ALS 单木提取

采用基于距离阈值的单木分割方法[15]对 ALS 点云数据进行单木提取。首先识别全局最高点作为首棵树顶点，依次判断相邻点是否属于独立个体，依

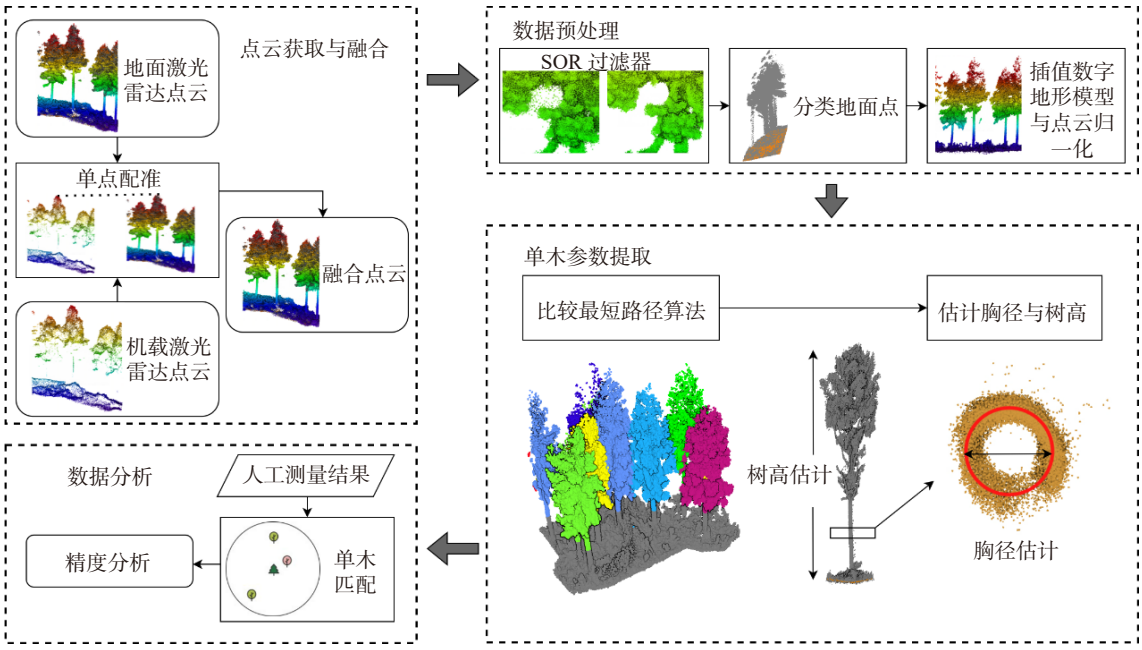


图 4 数据处理流程

Fig. 4 Data processing workflow

据点间距离与阈值判断是否为单独树木。

2.4　TLS 与融合点云单木提取

采用比较最短路径法[16]对 TLS 和融合点云数据进行单木提取。该方法是一种基于归一化点云的单木提取算法，适用于点云数据能够完整观测到树干的情况。其分割过程可分为树干检测和树冠分割两步。树干检测采用基于密度的噪声空间聚类算法，将点云数据中胸径处具有一定厚度的切片数据输入此算法进行聚类，并将聚类中心作为单木位置的种子点。在种子点的基础上，根据树木的形态学特征，利用比较最短路径对树冠进行分割。

2.5　ALS 单木胸径估算

针对 ALS 无法获取胸径点信息的问题，引入基于树高的异速生长模型进行间接估算[17]。模型形式为幂函数，公式如式(1)。

$$D = \beta H^{\alpha} \tag{1}$$

式中：D 为胸径，H 为树高，α 为异速生长指数，β 为标准化参数。

2.6　单木匹配

为了保证单木匹配的客观性和可重复性，本研究采用多因素匹配法[18]进行单木匹配。具体步骤如下：从地面实测数据中选择最高的单木作为基准单木；以基准单木为圆心，建立给定半径的圆形邻域，将邻域内的所有单木为备选单木；以备选单木与基准单木之间的距离、胸径、树高为匹配因子，计算所有备选单木与基准单木之间各匹配因子的欧氏距离；选择欧氏距离最小的备选木作为与基准单木匹配的单木。

2.7　精度评价

为了评价点云配准精度、单木分割精度以及单木参数提取精度，本研究分别采用树冠中心点距离、F_1 分数值、均方根误差(Root Mean Square Error，RMSE)和决定系数(R^2)等指标进行评估。

点云配准精度通过配准后两平台对应单木树冠投影中心点之间的距离[19]进行评价，计算公式如式(2)所示。

$$L = \sqrt{(X_a - X_t)^2 + (Y_a - Y_t)^2} \tag{2}$$

式中：L 为两树冠中心点之间的距离，X_a、Y_a 分别为 ALS 点云数据中树冠投影中心点的 x、y 坐标，X_t、Y_t 分别为 TLS 点云数据中树冠投影中心点的 x、y 坐标。

单木分割精度采用 F_1 分数作为评价指标。F_1 分数是评价模型分类性能的重要指标，综合考虑了精确率和召回率[20]。单木参数提取精度采用 RMSE、相对均方根误差(Relative Root Mean Squared Error，rRMSE)和 R^2 进行评价[21]。RMSE 和 rRMSE 值越小，说明单木参数提取误差越小；R^2 用于评价模型的拟合优度，R^2 越接近 1，说明模型拟合效果越好。

2.8　精度影响因子分析

为了分析杉木林龄对单木参数提取精度的影响，本研究使用 LidR(Ver 4.2.1，R 4.5.1)基于融合点云提取了多种单木点云特征变量，这些特征已被广泛证实可以有效应用于 LiDAR 森林结构建模，本研究提取的具体特征变量及其含义详见表 2。

在特征变量的基础上，本研究使用随机森林与广义加性模型(Generalized Additive Models，GAM)对参数提取残差进行分析。首先以龄组为因变量，特征变量为自变量构建随机森林分类模型，以模型输出的排序特征重要性评分作为指标，选出对组间差异贡献最显著的核心特征。之后将入选的特征变量与提取残差进行 GAM 回归建模，以分析单木参数提取误差与森林结构之间的关系。该方法可以有效处理特征变量间的非线性关联，准确分析影响单木参数提取精度的影响因素。

3　结果与分析

3.1　点云融合与配准精度

在幼龄林样地中，ICP 算法和单点配准算法的

表 2　单木点云衍生 LiDAR 特征变量

Tab. 2　LiDAR feature variables derived from individual tree points cloud

变量类型	特征变量	缩写
高度变量	最大高度	zmax
	平均高度	zmean
	高度偏斜度	zskew
	高度峰度	zkurt
	高度熵	zentropy
	高度标准差	zsd
	2米以上点占比	pzabove2
	高度均值以上点占比	pzabovezmean
	累计高度X十分位数	zpcum$X$
	高度X百分位数	zq$X$
强度变量	最大强度	imax
	平均强度	imean
	强度标准差	isd
	强度偏斜度	iskew
	强度峰度	ikurt
	累计强度X百分位数	ipcumzq$X$
其他	近似实际面积	area
	点数量	n

注：X为对应分位数。

平均对应单木树冠投影中心距离(L)均为 0.239 m；在中龄林样地中，单点配准的平均 L 值为 0.234 m，略优于 ICP 算法的 0.257 m；在成熟林样地中，两者平均 L 值分别为 0.256 和 0.248 m(图 5)。综合所有样地，单点配准算法的平均 L 值为 0.238 m，略低于 ICP 算法的 0.253 m，显示出更优的配准趋势。鉴于单点配准在操作便捷性上的优势及其相当甚至略优的精度，后续分析均采用该方法的结果。

如图 6 所示，融合后的点云在树冠与树干的形态上实现了无缝衔接，TLS 点云有效弥补了 ALS 在林下区域点云稀疏的缺陷，构建了从地面到树冠顶部的完整、高密度三维结构，为后续高精度单木分割与参数提取提供了坚实的数据基础。

3.2 单木分割

不同数据源在单木分割精度上表现出显著差异(表 3)。ALS 点云的分割效果最不理想，在所有样地中仅正确识别了 146 株树，F_1 分数介于 0.726 ~ 0.809 之间。特别是在冠层高度郁闭的成熟林中，其召回率低至 67.1%，大量漏检与错检导致其难以满足单木级应用的需求。相比之下，TLS 和融合点云均表现出优异且稳定的分割性能，在所有龄组中的 F_1 分数均不低于 0.961。这得益于两者都能获取清晰的树干信息，为基于树干的分割算法提供了可靠依据。总体而言，融合点云的分割精度与 TLS 相当，

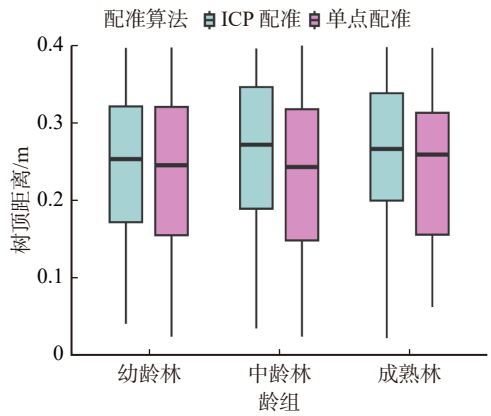


图 5 不同算法配准误差分析

Fig. 5 Registration error analysis of different algorithms

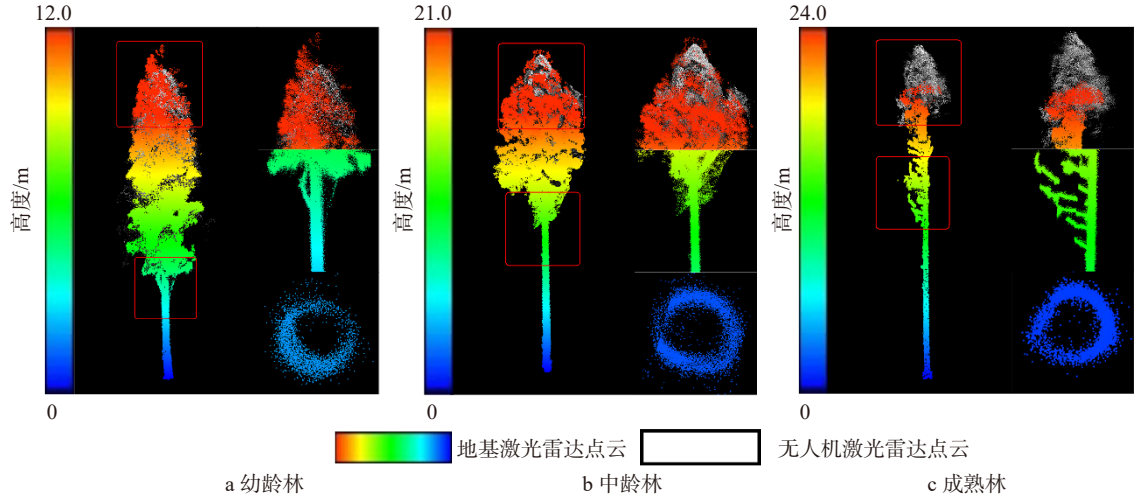


图 6 融合点云单木细节

Fig. 6 Individual tree details from the fused point cloud

表 3 单木识别精度分析（按龄组）

Tab. 3 Individual tree identification accuracy analysis by age group

龄组	点云类型	正确检测	漏检	错检	召回率/%	精确率/%	F_1分数
幼龄林	ALS点云	57	24	3	70.4	95.0	0.809
	TLS点云	81	0	4	100.0	95.3	0.976
	融合点云	80	1	4	98.8	95.2	0.970
中龄林	ALS点云	36	14	3	72.0	92.3	0.809
	TLS点云	50	1	3	98.0	94.3	0.962
	融合点云	49	2	2	96.0	96.1	0.961
成熟林	ALS点云	53	26	14	67.1	79.1	0.726
	TLS点云	80	1	0	98.8	100.0	0.994
	融合点云	77	4	0	95.1	100.0	0.985

且远超 ALS，证明了该框架在不同林龄杉木林中进行单木识别的鲁棒性。

3.3　树高提取

融合点云在单木树高提取方面表现出显著优势（表 4）。在幼龄林、中龄林和成熟林中，基于融合点云提取的树高与实测值拟合的 R^2 分别为 0.91、0.81 和 0.62，均明显高于单一平台的 ALS（0.72、0.78、0.50）和 TLS（0.70、0.75、0.59）。从误差来看，融合点云的 rRMSE 在各龄组中均保持在较低水平（3.09%～6.08%），显著优于 TLS。融合策略的优势在于，它结合了 ALS 精确捕捉树冠顶点的能力和 TLS 提供高精度地面点的能力，从而获得了最准确的树高。ALS 因其“自上而下”的视角，提取的树高优于 TLS，但其精度受 DTM 质量影响，且存在对矮树的漏检问题，此外，这种漏检会使得 RMSE 和 rRMSE 值因样本分布的不完整而难以完全反映 ALS 的真实精度水平。TLS 则因“自下而上”的视角遮挡，随着林龄增长和冠层郁闭，树高低估问题愈发严重。尽管融合点云的估算精度也随林龄增长略有下降，这可能与成熟林冠层更复杂、配准难度更大有关，但其在所有林龄段的综合表现均证明了其在树高提取中的优越性和可靠性。

3.4　胸径提取

本研究中，TLS 与融合点云通过圆拟合方法直接提取胸径，而 ALS 则通过构建的树高–胸径异速生长模型（$R^2 = 0.78, p < 0.001$）进行间接估算。如表 5 所示，3 类数据源的胸径估算精度差异显著。基于 ALS 的间接估算结果精度最低，rRMSE 普遍高于 10%，无法满足单木精度要求。

对比两种直接测量方法，融合点云在幼龄林和中龄林中表现更优。在幼龄林中，其 rRMSE（4.80%）低于 TLS（5.13%）；在中龄林中优势更明显，rRMSE（8.12%）显著低于 TLS（10.22%）。这表明在林分相对稀疏、通透性较好的情况下，ALS 点云能够为 TLS 点云提供有益的位置信息补充，减少因单站扫描不完整和 SLAM 建图变形造成的胸径提取误差。然而，在成熟林中，两种方法的精度趋于一致（rRMSE 分别为 2.04% 和 2.01%），融合带来的提升效果不明显。这可能是因为成熟林林冠密度高，使得 ALS 点云对近地面树干的信息贡献几乎为零。总

表 4　树高提取精度分析

Tab. 4　Analysis of tree height extraction accuracy

龄组	点云类型	回归方程	RMSE/m	rRMSE/%	R^2
幼龄林	ALS点云	$y = 0.983\,7x - 0.089\,1$	0.57	5.17	0.72
	TLS点云	$y = 0.976\,5x - 0.044\,3$	0.67	5.70	0.70
	融合点云	$y = 0.976\,5x - 0.044\,3$	0.34	3.09	0.91
中龄林	ALS点云	$y = 0.929\,0x + 0.708\,0$	0.92	4.88	0.78
	TLS点云	$y = 0.836\,4x + 2.458\,3$	1.26	6.96	0.75
	融合点云	$y = 0.964\,9x - 0.343\,3$	1.11	6.08	0.81
成熟林	ALS点云	$y = 0.698\,2x + 6.065\,7$	1.02	4.44	0.50
	TLS点云	$y = 0.844\,3x + 2.060\,8$	1.21	5.55	0.59
	融合点云	$y = 0.943\,7x - 0.536\,8$	1.04	4.75	0.62

表 5　胸径提取精度分析

Tab. 5　Analysis of diameter at breast height extraction accuracy

龄组	点云类型	回归方程	RMSE/cm	rRMSE/%	R^2
幼龄林	ALS点云	$y = 1.259\,6x - 3.543\,7$	1.57	10.06	0.47
	TLS点云	$y = 0.997\,1x - 1.363\,8$	0.74	5.13	0.89
	融合点云	$y = 0.940\,8x - 0.545\,2$	0.69	4.80	0.90
中龄林	ALS点云	$y = 1.055\,7x - 2.077\,6$	3.85	17.79	0.22
	TLS点云	$y = 0.814\,4x + 3.337\,3$	2.17	10.22	0.71
	融合点云	$y = 0.853\,1x + 2.879\,9$	1.73	8.12	0.82
成熟林	ALS点云	$y = 2.012\,5x - 24.987\,6$	3.20	11.81	0.42
	TLS点云	$y = 1.039\,1x - 0.196\,6$	0.52	2.01	0.98
	融合点云	$y = 1.017\,2x - 0.158\,6$	0.54	2.04	0.98

体而言，融合点云在胸径提取方面同样优于单一平台，其优势主要体现在中、幼龄林中。

3.5 精度影响因子

通过随机森林对单木点云龄组进行分类，通过排序重要性得到的前 3 个特征为 90% 累计高度、最大高度和最大反射强度(图 7)，选取这 3 个特征变量进一步使用 GAM 分析其与单木参数提取残差间的关系(表 6、表 7)；经过 GAM 检验，3 个核心特征及其交互作用与胸径残差均未表现出显著影响；对于树高残差，最大反射强度在中龄林和成熟林中具有显著的影响且线性度较低，90% 累计高度仅对成熟林有线性影响；从交互作用看最大反射强度与最大高度之间的交互作用具有明显的非线性效应，且能解释高达 22.10% 的树高残差偏差，90% 累计高度与最大反射强度间的交互作用也与树高提取残差有显著相关性，能解释 10.80% 的残差偏差。总体而言，对于树高提取，最大反射强度及其交互作用都与中龄林和成熟林中树高提取误差表现出显著的非线性关系；而对于胸径，无论是主效应还是交互作用，所选的核心特征几乎无法解释胸径提取的误差，意味着胸径误差源自其他未纳入分析的特征变量或提取精度较高，胸径残差的主要成分为随机噪声，导致解释力下降。

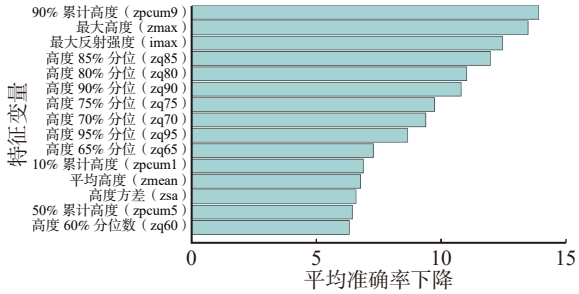


图 7 单木龄组分类特征重要性

Fig. 7 Feature importance for individual tree age group classification

4 讨 论

4.1 数据源结构性互补与融合框架的优势

本研究进一步证实了 ALS 与 TLS 在单木参数提取中的结构性互补价值。ALS 具备广域覆盖和自上而下的观测视角，能够更稳定地捕捉树冠顶点，因而在树高估算中具有天然优势，这与 Wang 等[22]的研究结论一致。然而，ALS 在密郁闭人工林中由于能量衰减，导致近地面点云稀疏，不仅 DTM 精度受限，且由于缺乏主干几何特征[4]，难以直接反演胸径。TLS 则凭借极高的点密度精细刻画了树干结构，但在高大林木调查中，受制于自下而上的视角遮挡，其光束难以穿透层叠的枝叶触达冠顶，导致树高常出现明显的系统性低估。

表 6 核心特征对提取残差的主效应分析

Tab. 6 Main effect analysis of core features on extracted residuals

特征变量	统计指标	树高残差			胸径残差		
		幼龄林	中龄林	成熟林	幼龄林	中龄林	成熟林
最大高度	估计自由度	1.000	1.000	2.581	1.048	2.30	1.001
	F	0.000	0.000	0.107	0.960	1.586	0.001
	p	1.000	1.000	0.900	0.243	0.137	0.986
90%累计高度	估计自由度	1.000	2.053	1.000	1.000	1.990	1.000
	F	0.369	1.252	5.866	0.13	0.508	0.575
	p	0.544	0.269	0.016*	0.719	0.563	0.449
最大反射强度	估计自由度	1.000	2.715	4.395	1.000	1.000	1.000
	F	0.000	5.982	0.001	0.763	0.008	0.001
	p	0.999	0.001**	< 0.001***	0.383	0.929	0.972

注：*表示$p < 0.05$，**表示$p < 0.01$，***表示$p < 0.001$。下同。

表 7 特征间交互作用对提取残差的影响

Tab. 7 Interaction effect analysis of features on extracted residuals

交互项	树高残差				胸径残差			
	估计自由度	*F*	*p*	偏差解释率/%	估计自由度	*F*	*p*	偏差解释率/%
90%累计高度，最大反射强度	6.345	2.280	0.027*	10.80	3.586	0.409	0.805	1.19
90%累计高度，最大高度	5.393	1.375	0.201	6.39	5.698	1.325	0.239	6.01
最大反射强度，最大高度	10.950	3.002	< 0.001***	22.10	5.667	1.028	0.446	4.99

本研究构建的融合框架通过空间基准统一，将 ALS 的树冠顶点探测优势与 TLS 的精细底图能力有机整合，实现了单木尺度上全要素结构的完整表征。结果显示，融合点云在树高拟合优度（R^2）上较单一平台平均提升了 0.03 以上。这种提升不仅源于几何形态的补全，更在于融合数据能够提供更稳健的种子点探测依据，使得分割算法在处理交错冠层时具备更强的鲁棒性[23]。与已有研究（朱俊峰等[7]）相比，本研究不仅在树高提取上实现了显著的精度跃升，在胸径反演上也因上部空间几何信息的补充而实现了有效优化，充分验证了该融合框架在复杂林分生境中的应用潜力。

4.2　林龄演变对单木参数提取精度的制约效应

林龄驱动的林分结构异质性，显著影响着多源点云提取森林参数的有效性。杉木从幼龄林向成熟林演替的过程，本质上是森林三维空间异质性与垂直郁闭度急剧增加的过程[8]，这直接重构了激光信号的传输路径与穿透能力。

在单木分割阶段，林龄增加导致的冠层重叠严重制约了单一 ALS 的识别精度，使其在成熟林中漏检和错检明显增加，这与许珊珊等[24]在云南松（*Pinus yunnanensis*）上的研究结论一致。相比之下，TLS 与融合点云的分割算法依赖于清晰的干基种子点[19]；融合数据由于整合了 TLS 完整的林下树干信息，有效突破了成熟林冠层郁闭造成的物理限制，在各龄组均维持了稳定的高精度（F_1 分数 $\geqslant$ 0.961），在单木识别层面表现出对林龄变化的不敏感性。

然而，尽管融合点云在单木识别阶段成功克服了林龄制约，但在随后的单木结构参数（胸径、树高）反演中，多源数据协同带来的精度增益却表现出极其强烈的“林龄依赖性”，呈现出明显的边际递减效应。对于胸径提取，融合点云的优势主要体现在幼龄林和中龄林：当林间空隙较大时，ALS 对树干上部的空间补充有助于抵消 TLS 部分视角遮挡误差[25]；但在成熟林中，高郁闭度冠层如同物理屏障，使得 ALS 对近地面树干信息贡献接近于零，融合带来的精度提升效应基本消失。在树高提取方面，融合方法虽在各林龄段均保持最优，但其提取精度在中龄林达到最佳后，在成熟林中呈下降趋势。这不仅受制于高密度冠层条件下，地面人工实测获取验证数据时（因枝叶遮挡导致测高仪瞄准困难）不可避免的基准误差增大[26]，更反映了单纯的数据叠加在面对极高郁闭度林分时，因激光穿透受阻而存在的物理局限性[27]。

4.3　参数提取系统性误差的物理驱动机制

除了宏观结构的演变，点云物理属性的改变以及非结构化生境物理特征的复杂性是引发系统性误差的深层机制。首先，在光束传输层面，广义加性模型的解析表明，树高提取误差并非随机分布，而是受到物理信号特征的严格制约。在中龄林和成熟林中，最大反射强度及其交互作用与树高提取误差表现出极显著的非线性统计关联（$p \leqslant 0.001$）。这从物理层面证实：随着林龄增加、冠层变厚，激光在冠层内的多次散射与能量衰减变得极其复杂[28]，这种光束传输路径与点云结构的改变，构成了树高测量系统性偏差的主要原因。

其次，林分致密的物理结构直接构成了点云空间配准的制约瓶颈[29]。在郁闭度极高的杉木林下，卫星定位信号遭到物理遮挡，且非结构化场景缺乏规则的几何特征，导致传统的依赖定位或实体标靶的配准方式极易失效[11]；同时，经典 ICP 算法也因特征缺失而易陷入局部最优[12]。这种由物理生境驱动的空间错位，会向后续的参数反演传递系统误差。本研究采用的无标靶单点配准策略，正是通过人工特征解译有效规避了复杂物理环境带来的空间错配风险，提升了底层数据的稳健性，从而保障了参数提取的可靠性。

综上所述，未来的多源点云融合研究应转变传统的静态几何拼接模式，构建“林龄/密度自适应”的动态融合策略。针对高郁闭林分中信号衰减与空间配准受限的实际难题：一方面，需探索基于激光反射强度的信号衰减补偿模型[30]，以纠正复杂散射引起的测距系统性偏差；另一方面，可引入基于深度学习的配准算法（如 DeepVCP[31]）或多尺度语义融合方法[32]，以克服复杂生境对点云空间对齐的制约，进而为全周期异龄林资源监测提供更具机理支撑的精准反演方案。

5　结　　论

本研究针对不同林龄阶段激光雷达单木参数提取精度不稳定的问题，构建了融合机载与地基点云的无标靶提取框架，系统评估了林分结构演变对杉木人工林树高和胸径提取精度的制约规律及其底层物理机制。

结果表明，融合点云显著提升了参数提取的整体精度，其单木分割 F_1 分数（$\geqslant$ 0.961）达到高密度地基激光雷达的同等水平，且在各林龄组的树高提取中均表现最优，有效修正了基于地基点云树高低估的系统性偏差。然而，数据融合的精度增益具有显著的林龄依赖性：在通透性较好的幼、中龄林中，多源融合能有效校正胸径提取的底层几何误差，使其 RMSE 分别降至 0.69 和 1.73 cm；但在高郁闭度

的成熟林中，因机载平台林下有效信号缺失，融合对胸径提取的精度补偿效应基本消失。提取残差模型进一步证实，树高提取精度受林分郁闭特征系统性制约，在中、成熟林中，树高残差与点云反射强度表现出极显著的非线性相关($p \leqslant 0.001$)，表明高郁闭度引发的激光散射及物理退化是导致误差的核心物理诱因；而胸径提取偏差则未受林木宏观结构特征的显著影响，趋于随机分布。

本研究明确了多源数据融合在不同发育阶段森林中的适用条件，证实了不区分郁闭度差异的简单点云融合，在面对茂密林分时会因激光穿透受限而难以发挥数据的协同优势；未来研究需探索林龄/密度自适应的动态融合策略，并将激光反射强度等变量引入信号衰减补偿机制，以适应更复杂的森林生境并推动全周期林业资源的精准自动化监测。

参 考 文 献

[1] Liu B, Liu Q, Zhu C, et al. Seed rain and soil seed bank in Chinese fir plantations and an adjacent natural forest in southern China: implications for the regeneration of native species [J]. Ecology and Evolution, 2022, 12: e8539.

[2] 吕梓晴, 段爱国. 不同产区杉木生物量与碳储量模型 [J]. 林业科学, 2024, 60(2): 1−11.
Lü Z Q, Duan A G. Biomass and carbon storage model of *Cunninghamia lanceolata* in different production areas [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(2): 1−11.

[3] Spadavecchia C, Belcore E, Piras M, et al. An automatic individual tree 3D change detection method for allometric parameters estimation in mixed uneven-aged forest stands from ALS data [J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4666.

[4] Zhang H, Ye Z, Qin X, et al. Improving regional forest biomass estimation with a UAV-driven hierarchical framework: a case study in Chinese fir plantations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2026, 19: 5758−5773.

[5] 丁志文, 邢艳秋, 尹伯卿, 等. 融合无人机和地基激光雷达点云数据估测单木结构参数 [J]. 森林工程, 2024, 40(1): 142−151.
Ding Z W, Xing Y Q, Yin B Q, et al. Fusion of UAV and TLS LiDAR point cloud data for estimating individual tree structure parameters [J]. Forest Engineering, 2024, 40(1): 142−151.

[6] Panagiotidis D, Abdollahnejad A, Slavík M. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 112: 102917.

[7] 朱俊峰, 刘清旺, 崔希民, 等. 地基与无人机激光雷达结合提取单木参数 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 51−58.
Zhu J F, Liu Q W, Cui X M, et al. Extraction of individual tree parameters by combining terrestrial and UAV LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14): 51−58.

[8] 吴树萍, 曹小玉, 闫文德, 等. 不同龄组杉木林空间结构和土壤养分特征及其关联度 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(7): 115−122,173.
Wu S P, Cao X Y, Yan W D, et al. Spatial structure and soil nutrient characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest of different age groups and their correlations [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(7): 115−122,173.

[9] Zhang X, Wang H, Chhin S, et al. Effects of competition, age and climate on tree slenderness of Chinese fir plantations in southern China [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 458: 117815.

[10] Feng T, Chen S, Feng Z, et al. Effects of canopy and multi-epoch observations on single-point positioning errors of a GNSS in coniferous and broadleaved forests [J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2325.

[11] 林承达, 谢良毅, 韩晶, 等. 基于激光点云的农田玉米种植株数数目识别 [J]. 激光技术, 2022, 46(2): 220.
Lin C D, Xie L Y, Han J, et al. Recognition of the number of corn plants in farmland based on laser point cloud [J]. Laser Technology, 2022, 46(2): 220.

[12] Besl P J, McKay N D. Method for registration of 3-D shapes [J]. Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures, 1992, 1611: 586−606.

[13] Chen J, Innes J L. The implications of new forest tenure reforms and forestry property markets for sustainable forest management and forest certification in China [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129: 206−215.

[14] Ye Z, Guo Q, Wei J, et al. Recognition of terminal buds of densely-planted Chinese fir seedlings using improved YOLOv5 by integrating attention mechanism [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 991929.

[15] Li W, Guo Q, Jakubowski M K, et al. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(1): 75−84.

[16] Tao S, Wu F, Guo Q, et al. Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 110: 66−76.

[17] Xiang W, Li L, Ouyang S, et al. Effects of stand age on tree biomass partitioning and allometric equations in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. European Journal of Forest Research, 2021, 140(2): 317−332.

[18] Eysn L, Hollaus M, Lindberg E, et al. A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the Alpine space [J]. Forests, 2015, 6(5): 1721−1747.

[19] Gupta S, Koch B, Weinacker H. Tree species detection using full waveform lidar data in a complex forest[C]//Wagner W, Székely B. Symposium: 100 Years ISPRS-Advancing Remote Sensing Science. Vienna: IAPRS, 2010: 249−254.

[20] Zhang H, Cai J, Cai M, et al. An upscaling framework for estimating regional-scale fractional cover of Chinese fir (FCCF)

by integrating UAV and satellite images [J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(1): 2510570.

[21] 宋子戈, 肖海, 张泰, 等. 机载 LiDAR 森林蓄积量非参数模型构建与残差分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(10): 86−95,123.
Song Z G, Xiao H, Zhang T, et al. Nonparametric model for forest stock volume estimation based on airborne LiDAR point cloud and residual analysis [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(10): 86−95,123.

[22] Wang Y, Lehtomäki M, Liang X, et al. Is field-measured tree height as reliable as believed: a comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 147: 132−145.

[23] Kukko A, Kaijaluoto R, Kaartinen H, et al. Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 132: 199−209.

[24] 许珊珊, 李常春, 张超. 结合背负式激光雷达和无人机机载激光雷达的云南松单木胸径和树高提取 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 939−948.
Xu S S, Li C C, Zhang C. Extraction of DBH and height of *Pinus yunnanensis* individual trees by combining backpack laser scanning and unmanned aerial vehicle laser scanning [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(5): 939−948.

[25] Paris C, Kelbe D, van Aardt J, et al. A novel automatic method for the fusion of ALS and TLS LiDAR data for robust assessment of tree crown structure [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 3679−3693.

[26] Stereńczak K, Mielcarek M, Wertz B, et al. Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 1284−1292.

[27] 曹林, 代劲松, 徐建新, 等. 基于机载小光斑 LiDAR 技术的亚热带森林参数信息优化提取 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 13−21.
Cao L, Dai J S, Xu J X, et al. Optimized extraction of forest parameters in subtropical forests based on airborne small footprint LiDAR technology [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 13−21.

[28] Yang X, Wang C, Xi X, et al. Assessment of multiple scattering in LiDAR canopy waveform [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 14394−14407.

[29] 王睿宇, 景会成, 包启龙. 基于特征提取和改进 ICP 的点云配准方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 805−812.
Wang R Y, Jing H C, Bao Q L. Point cloud registration algorithm based on feature extraction and improved ICP [J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 805−812.

[30] 尤号田, 邢艳秋, 冉慧, 等. 基于 LiDAR 点云能量信息的樟子松郁闭度反演方法 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(6): 30−35.
You H T, Xing Y Q, Ran H, et al. Inversion method for the crown density of Mongolian scotch pine from point cloud data of small-footprint LiDAR [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(6): 30−35.

[31] Lu W, Wan G, Zhou Y, et al. DeepVCP: An end-to-end deep neural network for point cloud registration[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Seoul: IEEE, 2019: 12−21.

[32] Dai W, Yang B, Liang X, et al. Automated fusion of forest airborne and terrestrial point clouds through canopy density analysis [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 156: 94−107.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　张会儒）