

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210296

基于地面激光扫描数据的马褂木材积建模与出材率研究

陈 军^{1,2} 孙 圆^{1,2} 刘晨曦¹ 姚睿涵¹ 于嘉辉¹ 曹福亮^{1,2} 余鹏飞³

(1. 南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037;
3. 睢宁县润企投资有限公司, 江苏 睢宁 220122)

摘要:【目的】马褂木是优良的用材树种, 研究其材积模型并分析多种密度种植下的径级材种造材出材率, 旨在为马褂木人工林高效培育提供重要的指导。【方法】在马褂木多密度人工林试验区获取全样地地面激光雷达数据。通过点云提取单木结构参数, 对 4 种造林密度(株行距配置: 2 m × 2 m、3 m × 3 m、4 m × 4 m、5 m × 5 m)马褂木试验林测树因子(胸径 DBH, 树高 H , 材积 V)进行分析, 建立一元材积方程、削度方程模型, 并应用削度方程计算各密度林分材种出材率。【结果】研究得到的一元二次式 $V = 0.0003D^2 + 0.0065D - 0.0369$ 为研究区马褂木最优一元材积式, 该模型的决定系数(R^2)为 0.884, 经过剩余标准差(S_{EE})、系统误差(T_{RE})、平均相对误差(M_{SE})、预估精度(ρ)等评价指标检验, 无明显系统偏差, 可用于研究区马褂木材积估计。研究选定改进的舒马赫方程式作为不同密度马褂木的削度方程, 该模型 R^2 为 0.924, 经检验方程均方根误差为 1.454, 平均相对误差为 0.050, 预估精度达到 0.910。进一步采用削度方程为多密度马褂木试验林进行多径级材造材, 得到疏林地 4 m × 4 m 密度种植下的大径材出材率最大(39.582%), 密林地 2 m × 2 m 密度种植下的小径材出材率最大(81.250%), 而综合出材率最大的是 4 m × 4 m 密度(98.650%)。【结论】马褂木多密度经营下, 疏林地大径材出材率最大, 密林则以小径材为主要径级材种。基于地面激光点云获取的单木参数可以直观地进行森林经理研究, 对提升人工林的生产经营水平以及提高林业工作者的工作效率均有积极影响。

关键词: 地面激光扫描; 点云; 测树因子; 一元材积表; 削度方程; 材种出材率

中图分类号: S792.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2023)06-0033-10

引文格式: 陈军, 孙圆, 刘晨曦, 等. 基于地面激光扫描数据的马褂木材积建模与出材率研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(6): 33-42. Chen Jun, Sun Yuan, Liu Chenxi, et al. Volume modeling and yield for *Liriodendron tulipifera* based on terrestrial laser scan data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(6): 33-42.

Volume modeling and yield for *Liriodendron tulipifera* based on terrestrial laser scan data

Chen Jun^{1,2} Sun Yuan^{1,2} Liu Chenxi¹ Yao Ruihan¹ Yu Jiahui¹ Cao Fuliang^{1,2} Yu Pengfei³

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

3. Suining County Run Enterprises Investment Co., Ltd., Suining 220122, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] *Liriodendron tulipifera* is an excellent timber species. It is of great significance to study the volume model of *L. tulipifera* wood and analyze the yield of merchantable timber under different densities for the efficient cultivation of *L. tulipifera* plantation. [Method] In this study, the terrestrial laser scan (TLS) data was obtained in the multi-density *L. tulipifera* plantation area in Jiangsu Province of eastern China. The single tree parameters (DBH, tree height H , volume V) were extracted for the various densities (2 m × 2 m, 3 m × 3 m, 4 m × 4 m, 5 m × 5 m) of the *L. tulipifera* sample stand. The single entry volume

收稿日期: 2021-08-05 修回日期: 2022-11-23

基金项目: 江苏省科技厅自然科学面上基金项目(BK20191388), 南京林业大学大创项目(2020NFUSPITP0235), 江苏省高校优势学科建设工程自助项目(PAPD)。

第一作者: 陈军, 博士生。研究方向: 森林培育。Email: 763502609@qq.com 地址: 210037 江苏省南京市玄武区龙蟠路 159 号南京林业大学林学院。

责任作者: 孙圆, 博士, 副教授。研究方向: 森林资源管理、林业遥感、森林精准培育。Email: yuan.sun@njfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

model was conducted and the taper equation model was established. The timber yield of each density stand was calculated by the taper equation. [Result] The quadratic formula with one variable: $V = 0.0003D^2 + 0.0065D - 0.0369$ was obtained as the single entry volume model for *L. tulipifera* wood in the study area. The model's coefficient of determination (R^2) was 0.884. After the test of residual standard deviation (S_{EE}), systematic error (T_{RE}), mean relative error (M_{SE}), precision estimation (ρ) and other indicators, there was no obvious systematic deviation, so the model can be used to estimate the volume of *L. tulipifera* in the study area. This study selected the improved Schumacher's equations as taper equation for different afforestation densities, the model's R^2 was 0.924, root mean square error (RMSE) was 1.454, and M_{SE} was 0.050, ρ was 0.910, etc. Furtherly, the taper equation was used to make multi-diameter grade wood in the multi-density afforestation forest sample plots. It was found that the output rate of large-diameter timber was the highest (39.582%) under $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ density planting forest, the output rate of small-diameter timber was the highest (81.250%) under $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ density planting forest, and the maximum composite yield was $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ density planting forest (98.650%). [Conclusion] For *L. tulipifera* plantation under the multi-density management, the yield of large-diameter timber in the open forest is the largest, while the small-diameter wood is the main diameter class in the dense forest. The single tree parameters obtained based on the ground laser point cloud could be intuitively studied for the forest manager, which has a positive impact on the improvement of the production and management level of the plantation and the improvement of the work efficiency of the forestry workers.

Key words: terrestrial laser scan; point cloud; mensuration factor; unary volume table; taper equation; yield of merchantable timber

森林资源是有限的再生资源和重要的环境资源,是人类和生物生存发展的基础,实现森林资源的可持续利用和科学经营管理是推动人地关系和谐共生的重要一环^[1]。一直以来,林业工作者致力于探索如何快速、高效、精准地提取森林信息,革新旧有的森林清查技术,将现有资源有效地整合,从而缓解林分调查耗时、耗力问题,实现森林精准监测^[2]。搭载多回波技术的地面激光扫描仪可以采用多站扫描方式获取林木的三维结构信息,基于活立木的点云数据能够实现多种测树因子的提取^[3],其中胸径、树高以及上部直径等提取结果均有较高的精度。前期研究^[4]利用地面激光扫描仪进行了多期马褂木(*Liriodendron tulipifera*)树干曲线的研究,结果表明:地面激光点云三维测量具有机动性、高精度、实时性、非接触性等优点,基于点云数据建立的削度方程精度比传统解析木方法更高^[5]。

近年来,国内外对马褂木的遗传改良研究较多,尤其在种间杂交与杂种优势利用领域取得了较为突出的成就^[6]。有学者^[7]利用树干解析的方法对24年生的马褂木进行人工林生长规律的研究,在此基础上进行胸径、树高和材积性状的相关分析,并对早期选择效率进行评价,在人工林高效培育方面进行了有效的指导。该树种在南方地区作为观赏树种小范围栽植,而大规模人工林的研究较少^[8]。此外,现有研究以生产性或经验性的技术总结为主,缺乏科学

依据和适宜的定量指标,特别是对马褂木人工林丰产培育与经营管理的研究不够深入^[9],经过近三十年的培育和种植,还尚未有相关种植区的专用材积表研建工作。

前期研究对试验区马褂木人工林同片林分进行了多期监测,证实了地基激光点云在干形获取中的优势^[5],本文以该试验区20年生多密度马褂木人工林试验地为研究对象,利用地面三维激光扫描仪获取活立木点云数据,提取活立木上部直径、树高、材积等测树因子,构建研究区马褂木立木材积一元方程与削度模型,编制马褂木一元材积表和材种出材率表,旨在为马褂木生产管理提供数据用表支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省句容市境内南京林业大学下蜀林场,地理位置为 $119^{\circ}14'E$ 、 $31^{\circ}59'N$,地形起伏不大,属低山丘陵区,且东西方向的宁镇山脉使得西北风难以置入林场,利于森林的生长^[10]。林场位于北亚热带季风气候区,光照充足,水热资源丰富,具有发展林业生产的良好条件。林场内的次生林以马褂木、湿地松(*Pinus elliottii*)为主,森林面积 314.4 hm^2 ,森林覆盖率超过90%,全场共有活立木蓄积量 $19\,099\text{ m}^3$ 。

马褂木多密度人工林试验地位于下蜀林场内,

造林时间为1999年3月, 试验地总面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^2$, 有5种密度林分(图1a)。本研究选取了 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 、 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 、 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 4个密度的马褂木林分为研究对象, 采用 Riegl VZ400i 地面激光扫描仪(图1b), 测站以标准木为中心, 设计“井”字形12站全样地扫描方式^[5](图1c), 获取研究区整体点云数据(图1d), 通过点云还原立木结构。

1.2 研究方法

1.2.1 点云数据获取

研究于2020年12月落叶期使用 Riegl VZ-400i 进行全样地扫描, 其扫描速率为500 000 点/s。各站点点云数据拼接集成被测样地的三维信息, 依靠仪器的自动拼接功能, 拼接精度为0.003 2 m(研究区标准地点云示例如图1d)。拼接完成后利用 RiSCAN PRO 软件, 通过设置偏差数值为25对点云数据进行去噪和归一化, 采用 LiDAR 360 软件提取样地数字高程模型(DEM), 再根据 DEM 赋予点云数据高程进行上部直径与特征参数的提取^[11]。研究采用迭代 K 均值聚类进行单木定位和分割, 为得到完整的立木点云, 设置的初始切割阈值较大, 所以在初步分割后还对非立木点云进行了手动去除, 以及分枝剔除, 最终得到完整的立木主干点云(如图2a, b所示), 相关方法参考文献^[12-13]。

1.2.2 林木参数提取

获取林木胸径数据首先要对点云数据进行降维处理, 即根据二维树干横断面切片数据进行圆的拟合。研究表明: 切片的厚度会严重影响参数提取的结果, 较薄的点云切片会难以识别, 从而导致出现异常值; 而过厚的切片难以进行圆柱体拟合, 具有较大的误差。参考前期研究结果^[14], 将切片厚度控制为0.1 m, 对树干进行间隔1 m的圆环切片, 切面圆环效果如下图2c所示。研究采用最小二乘法对马褂木立木上部直径进行拟合。

最小二乘法: 令 $\{(x_i, y_i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 为分布数据中待确定的点的集合, 若 (a, b) 为圆心坐标, r 为半径, 则可得圆的方程:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (1)$$

由方程(1)可知圆心坐标 (a, b) 和半径 r 。若 (x_i, y_i) 为点云数据中的离散点, 该点与圆心的距离为 r_i 。以该点为圆心、 r_i 为半径构成的圆的面积为 S_i , 若拟合出的圆的面积为 S , 则面积误差为:

$$\delta_i = S_i - S = \pi [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2] \quad (2)$$

根据最小二乘原理, 其优化目标函数为:

$$Q(a, b, r) = \min \quad (3)$$

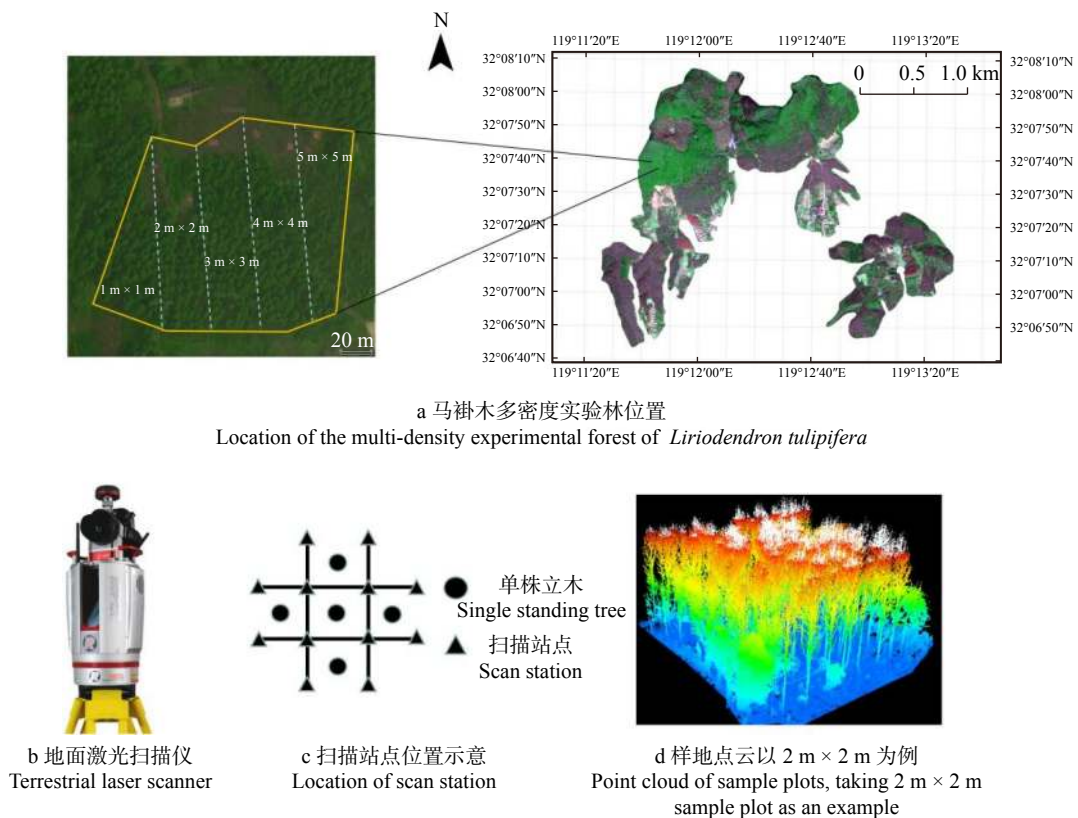


图1 研究区域位置和数据概览图

Fig. 1 Overview of research place and data

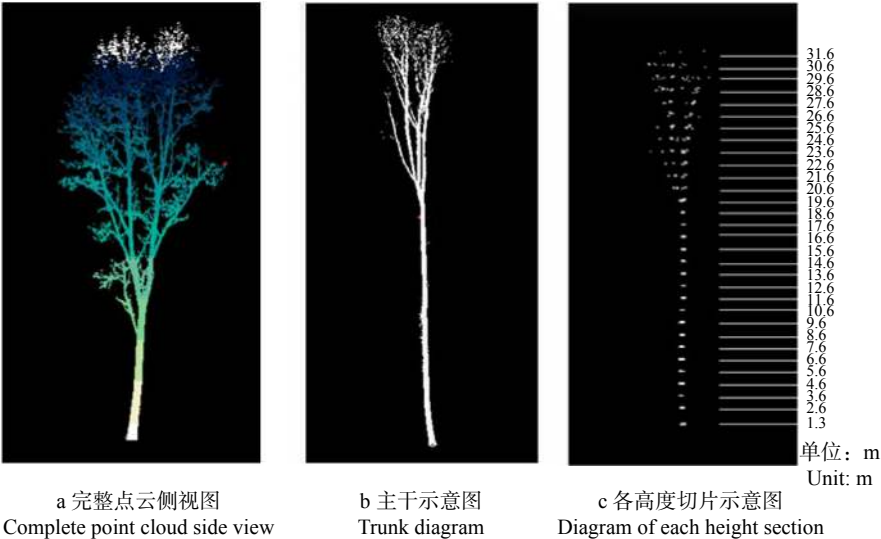


图 2 马褂木立木切片示意图
Fig. 2 Schematic diagram of standing wood section in *Liriodendron tulipifera*

式中: Q 为关于 a 、 b 和 r 的函数, 由函数的极值法可以使得 Q 取得极小值, 令:

$$\delta_Q \delta_a = \delta_Q \delta_b = \delta_Q \delta_r = 0 \tag{4}$$

可解得圆心的坐标 (a, b) 和半径 r 。

1.2.3 材积计算

立木材积计算采用中央断面积区分求积法^[15]。将单株立木点云切片后分成 2 m 区分段。每一个区分段看作一个圆柱, 区分段长度为 2 m, 中央圆盘即为该段中央段面积, 对每一株马褂木用中央断面积区分求积法求取材积, 从下至上, 最上部不足 2 m 部分或上部圆环无法计算直径的作为梢头, 公式如下:

$$V = l \sum_{i=1}^n g_i + \frac{1}{3} g' l' \tag{5}$$

式中: V 为立木材积, g_i 为各分段断面积, g' 为梢头断面积, l 为区分段长度, l' 为梢头长度, n 为区分段个数。

1.2.4 材积模型与一元材积表的编制

一元材积表具有广泛的适用性, 其以胸径为变量, 在林业调查中有重要的地位。本研究选择了 5 种常见的一元材积方程, 如表 1。用 DPS 17.1 软件

进行拟合, 采用决定系数(R^2)、预估精度(ρ)、剩余标准差(S_{EE})、系统误差(T_{RE})和平均相对误差(M_{SE})等评价指标, 综合评价一元材积方程的拟合效果^[12-16]。

1.2.5 削度方程与材种出材率表的编制

树干削度方程是林分材种出材量估计的基础。在传统外业测量中, 树木上部直径需人工测定, 建立林分目的树种树干削度方程成了林分收获估计的工作难点^[16]。沿用前期多种树木点云数据研建削度方程的经验^[14,16-17], 本研究使用 TLS 数据反演马褂木树干曲线、构建树种削度方程, 探索地面激光扫描仪在林分测定中的优势。

研究对象马褂木干形直通, 采用简单削度方程模拟即可达到较高的精度。由点云立木数据得到每株活立木的胸径(D)、树高(H)、对应高度(h)处直径(d)等数据, 将削度方程的一般形式转化为 $d^2 = f(D, H, h)$ 。转化后不仅可以更客观地对削度方程进行评价, 而且更能体现出削度方程的特性。如表 2 所示, 本研究选取了几种削度方程^[17]进行研究讨论。

根据材积规格进行造材计算, 按照大材大用、先造大材后造小材, 充分利用木材的原则进行单株木造材。将马褂木造材数据按中华人民共和国国家标准的材种规格划分出大径材、中径材、小径材和纸浆材 4 组数据^[17], 大、中、小径材小头直径分别不小于 26.0、20.0、6.0 cm, 其材长均不小于 2.0 m, 短小材小头直径不小于 4.0 cm 且不大于 12.0 cm, 其材长不小于 1.0 m 且不大于 4.8 m。

1.2.6 模型评价与检验指标

本研究采用十字交叉验证的方法, 从样本中随机选取 80% 的数据作为建模样本, 剩余 20% 作为检验样本, 对比分析模型的评价和检验指标, 选取最优

表 1 材积方程模型一览表

Tab. 1 List of volume equation models

公式 Formula	编号 No.
$y = a_0 + a_1 x$	V1
$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$	V2
$y = a_0 \ln x + a_1$	V3
$y = a_0 x^{a_1}$	V4
$y = a_0 e^{a_1 x}$	V5

注: y : 立木材积(m^3); x : 直径(cm); a_i : 参数($i = 0, 1, 2$)。Notes: y : standing volume (m^3); x : diameter (cm); a_i : parameter ($i = 0, 1, 2$).

表 2 削度方程模型一览表
Tab. 2 List of taper equation models

公式 Formula	编号 No.
$d = D \left(\frac{H-h}{H-1.3} \right)^{a_0}$	T1
$\left(\frac{d}{D} \right)^2 = a_0 + a_1 \left(\frac{H-h}{H-1.3} \right)^{a_2}$	T2
$d^2 = a_0 D^{a_1} \frac{(H-h)^{a_2}}{H^{a_3}}$	T3
$d^2 = a_0 D \left(\frac{H-h}{H-1.3} \right)^{a_1}$	T4
$d^2 = D^2 \left(\frac{H-h}{H-1.3} \right)^{a_0}$	T5

注： d 为树干 h 高处的带皮直径(cm)； D 为带皮胸径(cm)； H 为全树高(m)； h 为距地面的高度(m)； a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为待定参数。下同。Notes: d is the diameter (cm) of the bark at h height of the trunk; D is DBH (cm) with bark; H is the total tree height (m); h is the height (m) above the ground; a_0 , a_1 , a_2 , a_3 are undetermined parameters. The same below.

模型。采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、赤池信息准则(AIC)作为模型拟合优度指标, 计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{6}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2} \tag{7}$$

$$AIC = N \ln \left(\frac{SSE}{N} \right) + 2 \tag{8}$$

式中： y_i 为实测值， $\bar{y}$ 为实测平均值， $\widehat{y}_i$ 为模型预测值， n 为样本个数， N 为方程参数个数，SSE为剩余平方和。其中 R^2 越大，RMSE、AIC 越小，表明模型对数据的切合度较好。

同时本研究选用剩余标准差(S_{EE})、系统误差(T_{RE})、平均相对误差(M_{SE})和预估精度(ρ)等指标作为模型预测能力的检验指标, 计算公式如下所示:

$$S_{EE} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \widehat{y}_i)^2}{n - m - 1}} \tag{9}$$

$$T_{RE} = \frac{\sum y_i - \sum \widehat{y}_i}{\sum \widehat{y}_i} \times 100\% \tag{10}$$

$$M_{SE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \widehat{y}_i}{\widehat{y}_i} \right) \times 100\% \tag{11}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{t_{0.05} \sqrt{\sum (y_i - \widehat{y}_i)^2}}{\widehat{y}_i \sqrt{n(n-m)}} \right) \times 100\% \tag{12}$$

式中： y_i 为实测值， $\bar{y}$ 为实测平均值， $\widehat{y}_i$ 为模型预测值， n 为样本个数， m 为方程参数个数。

选取 R^2 最大、RMSE 最小的模型，同时综合模型预测能力的检验指标，以 $S_{EE} \leq 10$ 、 $T_{RE} \leq \pm 5\%$ 、 $M_{SE} \leq \pm 10\%$ 的标准来检验模型的适用性，均在误差范围内且预估精度较高的模型即可被选为最优模型。

2 结果与分析

2.1 单木胸径提取结果

经过点云提取和参数量取，本次研究胸径处即开始分叉的树有 9 株，各分支均记为单独的木材来计算，经过对比筛选，剔除精度过低的数据后共得到 224 株的立木参数，其中地径、胸径、树高和计算得到的材积平均值如下表 3 所示。

以实测胸径为依据，对点云提取的每株胸径值做检验，如图 3 所示：2 组数据的截距为 0.156，斜率为 0.995，单木参数自动提取结果与人工实测值得到的直线方程的 R^2 大于 0.99，说明自动提取的参数估计值与实测值之间存在线性相关的关系，也表明此次获取的数据精度较高，可用于之后的分析研究工作。

同时，从 4 块不同密度的林分整体呈现的情况来看，造林密度对胸径影响显著。高密度 2 m × 2 m 林分的胸径平均值为 16.2 cm，而低密度 5 m × 5 m 林分的胸径平均值为 21.92 cm，而且整体胸径呈现出随造林密度的增加而减小的趋势。整体而言，造林密度对树高的影响不够显著，但也呈现出稍许的

表 3 点云测定马褂木测树因子概况

Tab. 3 General situation of mensuration factors of *Liriodendron tulipifera* forest with point cloud

样地密度 Sample plot density	株数 Plant number	平均地径 Average ground diameter/cm	平均DBH Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	平均材积 Average volume/m ³
2 m × 2 m	79	23.200	16.200	17.860	0.184
3 m × 3 m	79	27.820	20.570	17.220	0.213
4 m × 4 m	48	29.000	20.890	16.520	0.184
5 m × 5 m	18	30.870	21.920	16.570	0.213
总计/平均 Total/mean	224	27.723	19.895	17.043	0.198

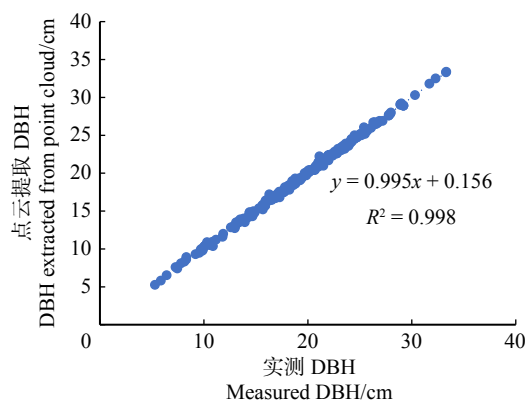


图3 胸径点云提取值与实测值拟合散点图

Fig. 3 Scatter plot fitting of extracted and measured values from DBH point cloud

差异,表现为高密度林分的树高平均值大于低密度林分。

2.2 材积表研建

根据上文点云数据分析的结果,采用点云数据计算得到的材积(V)和提取的胸径(D),拟合所有一元材积方程。如图4所示,图中方程字体颜色与曲线颜色对应。

拟合结果与验证精度如表4所示。受造林密度与分叉树的影响,整体来说,一元材积方程的拟合精度不够高,只有模型V4的 R^2 在0.9以上,但从其他评价指标来说, S_{EE} 、 T_{RE} 、 M_{SE} 均要高于模型V2,说明V4拟合单株立木的材积与真实值相差较大,故本文选择模型V2用于一元材积表的研建。

2.3 削度方程与造材计算

2.3.1 削度方程模型拟合

研究利用4个造林密度所有样本的80%为建模样本(即2 m × 2 m林分64株、3 m × 3 m林分64株、4 m × 4 m林分38株、5 m × 5 m林分14株单木数据),对不同造林密度的削度方程进行建模分析,分别拟合了5个削度方程模型,得到的参数如表5所示。4种造林密度以及整体林分的削度方程建模结果均表现为T3的拟合结果较好, R^2 最大为0.964(5 m × 5 m林分),全数据整体的拟合效果也

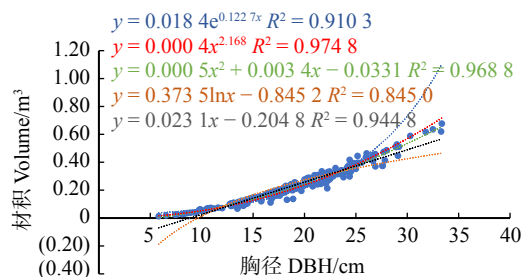


图4 一元材积方程拟合情况

Fig. 4 Fitting condition of univariate volume equations

是T3模型最优。

2.3.2 模型检验

应用4个造林密度剩余20%检验样本(即2 m × 2 m林分15株、3 m × 3 m林分15株、4 m × 4 m林分10株、5 m × 5 m林分4株单木数据)进行模型预测能力的检验,检验结果如表6所示。

根据上述检验结果,各模型在4种密度林地建模后的 S_{EE} 均小于10,最小值分别为0.052、0.051、0.047、0.014; T_{RE} 最小值分别为1.112%、0.087%、6.60%、1.561%,除4 m × 4 m样地外,都在 $T_{RE} \leq \pm 5\%$ 的误差范围内;平均相对误差(M_{SE})均在 $M_{SE} \leq \pm 10\%$ 的误差范围内;且模型预估精度(ρ)除4 m × 4 m样地外,均在0.8以上,3个造林密度均能达到很好的模拟效果。其中削度方程T3的适用性最强,可以进一步进行材积表和材种出材率表的编制。

2.3.3 材种出材率表的编制

根据以上的结论,本文所选削度方程T3表达式为: $d^2 = a_0 D^{a_1} \frac{(H-h)^{a_2}}{H^{a_3}}$,经过反算推导出累积材长方程:

$$h = H - \left(\frac{d^2 H^{a_3}}{a_0 D^{a_1}} \right)^{\frac{1}{a_2}} \quad (13)$$

计算各材种小头带皮直径对应的原木累积用材长度,公式如下:

$$H_{\text{大}} = H - \left(\frac{26^2 H^{a_3}}{a_0 D^{a_1}} \right)^{\frac{1}{a_2}} \quad (14)$$

表4 一元材积模型拟合结果

Tab. 4 Fitting results of univariate volume models

模型编号 Model No.	公式 Formula	R^2	S_{EE}	$T_{RE}/\%$	$M_{SE}/\%$
V1	$V = 0.016 4D - 0.122 3$	0.873	0.009	0.004	-184.440
V2	$V = 0.000 3D^2 + 0.006 5D - 0.036 9$	0.884	0.008	0.003	-1.279
V3	$V = 0.026 6\ln D - 0.581 2$	0.798	0.112	0.001	-20.018
V4	$V = 0.000 6D^{1.945 7}$	0.902	0.017	-0.066	39.572
V5	$V = 0.019 5e^{0.109 6D}$	0.823	0.056	0.271	-56.163

注: R^2 决定系数; S_{EE} 剩余标准差; T_{RE} 系统误差; M_{SE} 平均相对误差。Notes: R^2 , determination coefficient; S_{EE} , residual standard deviation; T_{RE} , systematical error; M_{SE} , average relative error.

表 5 不同造林密度削度方程模型参数

Tab. 5 Model parameters of taper equations with different afforestation densities

密度 Density	模型 Model	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2	RMSE	AIC
2 m × 2 m	T1	0.625				0.945	0.940	-3 479.60
	T2	0.141	0.887	1.694		0.950	0.901	-3 501.80
	T3	3.237	2.130	1.247	1.761	0.949	0.904	-3 499.70
	T4	16.887	1.193			0.793	1.829	-3 115.20
	T5	1.250				0.945	0.940	-3 479.60
3 m × 3 m	T1	0.824				0.907	1.674	-4 348.70
	T2	0.063	0.930	1.903		0.911	1.636	-4 362.30
	T3	10.648	2.262	1.584	2.665	0.914	1.603	-4 375.30
	T4	21.401	1.557			0.815	2.357	-4 101.80
	T5	1.648				0.907	1.674	-4 348.70
4 m × 4 m	T1	1.006				0.872	2.746	-2 098.50
	T2	0.042	0.866	2.053		0.886	2.662	-2 110.00
	T3	9.253	1.706	1.775	2.220	0.899	2.580	-2 121.10
	T4	20.367	1.766			0.865	2.792	-2 087.10
	T5	2.011				0.872	2.746	-2 093.40
5 m × 5 m	T1	0.961				0.952	1.416	-817.72
	T2	0.010	0.993	1.981		0.952	1.414	-817.01
	T3	0.094	1.482	1.914	0.456	0.964	1.226	-840.86
	T4	22.732	1.860			0.859	2.429	-724.96
	T5	1.923				0.930	1.594	1 641.07
整体 Total	T1	0.866				0.952	1.504	1 641.07
	T2	0.025	0.965	1.822		0.931	1.504	1 642.55
	T3	2.758	1.861	1.618	1.783	0.954	1.454	1 505.00
	T4	20.409	1.522			0.825	2.214	3 192.55
	T5	1.643				0.922	6.887	7 747.51

表 6 不同造林密度削度方程模型的适用性检验结果

Tab. 6 Applicability test results of taper equation models with different afforestation densities

密度 Density	模型 Model	S_{EE}	$T_{RE}/\%$	$M_{SE}/\%$	ρ
2 m × 2 m	T1	0.117	-4.001	-4.20	0.862
	T2	0.061	-3.772	-3.90	0.862
	T3	0.052	-3.438	-1.10	0.863
	T4	0.154	1.112	-3.20	0.873
	T5	0.117	-4.000	-4.20	0.862
3 m × 3 m	T1	0.051	1.250	-3.20	0.846
	T2	0.058	0.626	-0.80	0.847
	T3	0.057	0.087	-0.02	0.849
	T4	0.207	7.415	-9.50	0.831
	T5	0.051	1.250	-0.01	0.846
4 m × 4 m	T1	0.057	14.805	21.50	0.681
	T2	0.058	16.523	21.40	0.689
	T3	0.047	6.600	10.70	0.701
	T4	0.055	12.481	12.30	0.697
	T5	0.056	14.327	16.30	0.699
5 m × 5 m	T1	0.014	5.544	7.90	0.972
	T2	0.015	5.511	7.80	0.996
	T3	0.014	1.561	7.90	0.996
	T4	0.118	11.530	12.70	0.994
	T5	0.017	8.240	10.90	0.995

$$H_{中} = H - \left(\frac{20^2 H^{a_3}}{a_0 D^{a_1}} \right)^{\frac{1}{a_2}} \tag{15}$$

$$H_{小} = H - \left(\frac{6^2 H^{a_3}}{a_0 D^{a_1}} \right)^{\frac{1}{a_2}} \tag{16}$$

以上 H 值为立木单独造木材种的累积材长,然而,在实际造材过程中,为了充分利用材积,单株立木通常同时造大、中、小径材,先造大径材后中径材、小径材,因此计算原木整体用材长度($L_{大}$ 、 $L_{中}$ 、 $L_{小}$)分别为:

$$L_{大} = H_{大} \tag{17}$$

$$L_{中} = H_{中} - H_{大} \tag{18}$$

$$L_{小} = H_{小} - H_{中} \tag{19}$$

对公式(15)~(17)积分推导得出大、中、小径材积公式为:

大材径材积: $V_{L_{26}} = \frac{Ka_0 D^{a_1}}{(a_2 + 1)H^{a_3}} \left[H^{a_2+1} - (H - H_{26})^{a_2+1} \right] \tag{20}$

中材径材积: $V_{L_{20}} = \frac{Ka_0 D^{a_1}}{(a_2 + 1)H^{a_3}} \left[(H - H_{26})^{a_2+1} - (H - H_{20})^{a_2+1} \right] \tag{21}$

小材径材积: $V_{L_6} = \frac{Ka_0 D^{a_1}}{(a_2 + 1)H^{a_3}} \left[(H - H_{20})^{a_2+1} - (H - H_6)^{a_2+1} \right] \tag{22}$

式中: D 为带皮胸径(cm), H 为树高(m), $a_i(i = 0,1,2,3)$ 为削度方程参数, $K = \pi/40\ 000$ 。

用以上公式为每个密度林分的所有立木计算径

级材种出材材长、材积和出材率,结果汇总如表 7 所示。受到总株数影响,各密度马褂木林分总蓄积量最大为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 密度林分。各个径级材种造材率从大到小排序依次为:大径材, $5\text{ m} \times 5\text{ m} > 4\text{ m} \times 4\text{ m} > 3\text{ m} \times 3\text{ m} > 2\text{ m} \times 2\text{ m}$; 中径材, $4\text{ m} \times 4\text{ m} > 3\text{ m} \times 3\text{ m} > 5\text{ m} \times 5\text{ m} > 2\text{ m} \times 2\text{ m}$; 小径材, $2\text{ m} \times 2\text{ m} > 3\text{ m} \times 3\text{ m} > 4\text{ m} \times 4\text{ m} > 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。出材率总和最高的是 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 密度林分(98.65%)。

3 讨 论

已有的研究采用 4 站^[17]、5 站^[3]或者多站^[6]、单站^[18]的方法完成样地立木参数估计,干型提取精度从 75% 到 85%,本研究采用 12 站井字形扫描(图 1),可以保证被测立木数据完整,在不伐倒、锯断和爬树的情况下获得研究区下蜀林场马褂木多密度林分活立木精准数据,直径提取精度达到 99%(图 3)并计算立木材积。这可以反映样地中立木的平均生长状态,对该方法的推广值得进一步研究,特别是在测站设置和数据提取算法上,进一步精准描述林木的三维结构。

点云数据的反演不光体现在直径的提取,对林下的其他测树因子也可以提供翔实的实景数据,如生物量^[19]、树干相对位置^[5]和叶面积指数^[20]等,进而实现对单木材积和林分总蓄积量的测量。有研究表明:林分中 70%~80% 的生物量储存在树干中,以树干材积可以直接估测林分生物量^[21]。现有结果对全林分立木的蓄积做了 3 类径级材种的出材汇总,进

表 7 不同密度马褂木人工林材种出材率

Tab. 7 Yield of artificial *Liriodendron tulipifera* plantations with different densities

项目 Item		密度 Density			
		5 m × 5 m	4 m × 4 m	3 m × 3 m	2 m × 2 m
株数 Plant number		18	48	79	79
蓄积 Volume/cm ³		5.002	13.236	20.948	14.955
胸径 DBH/cm	平均 Average	21.918	20.959	17.046	16.413
	最大 Max.	33.300	30.300	33.370	26.050
	最小 Min.	10.370	8.100	9.480	5.820
树高 Tree height/m	平均 Average	16.569	16.456	17.046	16.063
	最大 Max.	18.810	20.470	19.520	16.840
	最小 Min.	13.680	10.220	11.030	7.540
造材材积 Merchantable wood volume/cm ³	大径 Big	1.245	1.266	2.003	0.143
	中径 Middle	1.552	5.239	6.752	2.331
	小径 Small	1.914	6.552	11.878	12.151
出材率 Yield/%	大径 Big	24.885	9.568	9.563	0.957
	中径 Middle	31.020	39.582	32.232	15.588
	小径 Small	38.269	49.500	56.704	81.250
合计 Total		94.174	98.650	98.499	97.796

一步研究可以结合有叶点云数据,完成冠层估计,进而增加全立木生物量、碳储量的测定与分析。

出材计算依赖于削度模型,削度方程也称为干曲线方程,表现树干直径随着高度增加而变细的缓急程度。受制于数据精度最初的干曲线研究十分困难,随着计算能力的提高逐步从多项式发展到非线性模型,进而扩展出分段形式和可变参数等形式^[17,22]。本研究在检验胸径提取精度的基础上,提取了上部直径建立了马褂木的削度方程。该方程修订了原有变量形式为 d^2 ,保证了方程评价的公平性,也体现了削度方程估计上部高度直径的特性,并为下一步材积计算提供了方便。同时这一方程也在其他速生树种的研究中有过相关应用^[5,17]。杂交马褂木生长快、干形通直、有较强的适应性和抗性,是一种优良的用材树种^[8]。本研究结果表明:疏林 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 密度种植下的大径材出材率最大(39.582%),密林 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 密度种植下的小径材出材率最大(81.25%),而综合出材率最大的是 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 密度(98.650%)。研究得到的干曲线数据为提高森林经营管理提供新的可能性。在林分收获前,可使用本研究建立的非破坏式的立木干曲线反演方法记录样地内立木状态,进而结合市场价格估计适销径长和小头直径及其收获价值^[9]。未来还需要更多的研究来对不同立地条件下材种出材率进行比较,这将有效提高森林可持续经营效果。

4 结 论

本研究利用地面激光雷达的精准特性,实现了样地单木参数高精度、可持续和非破坏性的测量,自动提取的胸径与人工实测胸径值相关性达到0.99,表明自动提取数据与人工实测数据无显著差异。基于地面激光点云获取的单木参数可以直观地进行森林经理研究,对提升人工林的生产经营水平以及提高林业工作者的工作效率均有积极影响。

基于不同造林密度的马褂木地面激光雷达点云数据,提取了单木结构参数,建立了二项式模型 $V = 0.000\ 3D^2 + 0.006\ 5D - 0.036\ 9$ 作为研究区立木材积模型。采用改进舒马赫模型拟合不同造林密度马褂木削度方程,并建立研究区材种出材率表。马褂木多密度经营下,疏林地大径材出材率最大,密林则以小径材为主要径级材种。该研究所用的基于激光扫描点云数据的削度方程建立方法,使材长和材积估测实现了自动化并达到可用的精度,有望在下一步研究中实现对树干生物量和林分总体生物量的自动化测算。

参 考 文 献

- [1] 贾忠奎. 我国人工林长期生产力维持技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 49–54.
- Jia Z K. Research progress of maintenance technology of long-term productivity of plantation in China[J]. World Forestry Research, 2012, 25(1): 49–54.
- [2] 李增元, 庞勇, 刘清旺, 等. 激光雷达森林参数反演技术与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 204–234.
- Li Z Y, Pang Y, Liu Q W, et al. LiDAR forest parameter retrieval technology and method[M]. Beijing: Science Press, 2015: 204–234.
- [3] Liang X L, Hyypä J, Kaartinen H, et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 144(10): 137–179.
- [4] Ekaterina B, Oscar P P, Tarek S M, et al. Using terrestrial laser scanning for characterizing tree structural parameters and their changes under different management in a Mediterranean open woodland[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 486(4): 118945–118961.
- [5] Sun Y, Lin X Y, Gong Y L, et al. Multi-station LiDAR scanning-based hierarchical features for generation of an allometric stem volume model[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(2): 028503.
- [6] Wang Y S, Pyörälä J, Liang X L, et al. In situ biomass estimation at tree and plot levels: what did data record and what did algorithms derive from terrestrial and aerial point clouds in boreal forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232(10): 111309.
- [7] Chen J H, Hao Z D, Guang X M, et al. *Liriodendron* genome sheds light on angiosperm phylogeny and species-pair differentiation[J]. Nature Plants, 2019(5): 18–25.
- [8] 郝自远, 李火根, 康昊, 等. 北美鹅掌楸人工林生长规律及早期选择可行性探究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 878–885.
- Hao Z Y, Li H G, Kang H, et al. Growth pattern and early selection of *Liriodendron tulipifera*[J]. Forest Research, 2017, 30(5): 878–885.
- [9] 蔡伟建. 杂交马褂木人工林培育技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- Cai W J. Research on cultural technology of *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera* plantation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [10] 李淑娟. 下蜀实习林场地理信息系统建立与应用[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- Li S J. Establishment and application of geographic information system in Xiashu Forestry Centre[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [11] Mcgaughe R J. FUSION/LDV: software for LIDAR data analysis and visualization[M]. Washington: USDA Forest Service, 2022.
- [12] 汪献义, 邢艳秋, 尤号田, 等. 基于近邻几何特征的 TLS 林分点

- 云分类研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 138–146.
- Wang X Y, Xing Y Q, You H T, et al. TLS point cloud classification of forest based on nearby geometric features[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 138–146.
- [13] 刘鲁霞, 庞勇, 李增元. 基于地基激光雷达的亚热带森林单木胸径与树高提取[J]. 林业科学, 2016, 52(2): 26–37.
- Liu L X, Pang Y, Li Z Y. Individual tree DBH and height estimation using terrestrial laser scanning (TLS) in a subtropical forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(2): 26–37.
- [14] 蒋佳文, 温小荣, 顾海波, 等. 基于多站扫描的点云特征参数与材积结构动态分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 3(6): 83–90.
- Jiang J W, Wen X R, Gu H B, et al. Dynamic analysis of point cloud characteristic parameters and volume structure based on multi-station scan[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 3(6): 83–90.
- [15] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- Meng X Y. Forest measurement[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [16] 靳晓东, 姜立春. 基于树干不同形率的樟子松立木材积方程研建[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 78–86.
- Jin X D, Jiang L C. Equation construction on standing tree volume of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* based on different form quotients of trunk[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 78–86.
- [17] Sun Y, Liang X L, Liang Z Y, et al. Deriving merchantable volume in poplar through a localized tapering function from non-destructive terrestrial laser scanning[J]. Forests, 2016, 7(12): 87–95.
- [18] Li Y M, Guo Q H, Su Y J, et al. Retrieving the gap fraction, element clumping index, and leaf area index of individual trees using single-scan data from a terrestrial laser scanner[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 130(8): 308–316.
- [19] Cao L, Coops N, Sun Y, et al. Estimating canopy structure and biomass in bamboo forests using airborne LiDAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 148: 114–129.
- [20] 黄星旻, 孙圆, 刘慧倩, 等. 多回波点云数据解算单株木叶面积指数[J]. 遥感学报, 2018, 22(6): 1042–1050.
- Huang X W, Sun Y, Liu H Q, et al. Resolving leaf area index of individual trees based on multi-return terrestrial laser point cloud data[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(6): 1042–1050.
- [21] Shen X, Cao L, Chen D, et al. Prediction of forest structural parameters using airborne full-waveform LiDAR and hyperspectral data in subtropical forests[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1729.
- [22] Schumacher F X, Hall F S. Logarithmic expression of timber tree volume[J]. Journal of Agricultural Research, 1993, 47: 719–734.

(责任编辑 范娟 赵田芸
责任编辑 惠刚盈)