

## 基于 2 期地基激光数据的杨树干形变化监测

蒋映萱<sup>1,2</sup>, 温小荣<sup>1,2\*</sup>, 蒋佳文<sup>1,2</sup>, 朱 硕<sup>1,2</sup>, 孙 圆<sup>1,2</sup>, 翁卫松<sup>3</sup>, 徐 达<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037;

3. 浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310020)

**摘 要:**利用地基激光扫描技术采集了泗洪县陈圩林场中 4 块样地 178 株杨树的 2 期点云数据, 对其进行干形变化分析。首先建立试验形率与胸高形数的估测模型, 然后将  $(h+3)/2$  引申到树木干形分析中, 定义 TAP 和 TAP 累积量, 尝试用干形指标描述 2 期 TLS 数据的不同造林密度下杨树干形变化, 最后对研究区整体干形变化进行分析。结果表明, 试验形率可有效估测胸高形数,  $R^2$  为 0.773, RMSE 为 0.37%; TAP 累积量和材积变化量随造林密度增加而降低, 高径比变化量随造林密度增加而增加; 研究区整体树木削度减少, 材积增加, 干形趋于通直圆满。因此, 相较于传统干曲线严谨复杂的计算方法, TAP 累积量的计算更加方便易算, 用以代替连续的曲线方程, 可以近似描述树木干形变化, 为后续干形变化研究提供了新的思路。

**关键词:**点云数据; 干形变化; 对比分析; 造林密度; 杨树

**中图分类号:**S771.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2021)05-0140-06

### Observation on the Changes of Poplar Stem Based on 2-Phase Data of Terrestrial Laser Scan

JIANG Yi-xuan<sup>1,2</sup>, WEN Xiao-rong<sup>1,2\*</sup>, JIANG Jia-wen<sup>1,2</sup>, ZHU Shuo<sup>1,2</sup>, SUN Yuan<sup>1,2</sup>,  
WENG Wei-song<sup>3</sup>, XU Da<sup>3</sup>

(1. Co-Innovation 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. Zhejiang Forest Resources Monitoring Center, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

**Abstract:** In this study, using ground-based laser to scan 178 poplar trees in 4 plots set in Chenwei Forest Farm in Sihong, Zhejiang Province the data of 2-phase ground-based laser point cloud were obtained. With the help of RiSCAN Pro to pre-process the data, to extract tree height, diameter of each part and other tree measuring factors, the shape parameters were modeled, and the trunk shape changes of four different planting densities (row spacing of 6 m×6 m, 4.5 m×8 m, 5 m×5 m, 3 m×8 m) were compared. The main research results were as follows: 1) design the concepts of experimental shape rate, the accumulation of TAP per unit area. An index system with  $(h+3)/2$  as the core is established to evaluate the change of tree stem shape. 2) Through the comparative analysis of the changes of tree trunk shape and volume under different planting density in the two periods, it is found that the growth of trunk shape and volume is the best under the condition of 6 m×6 m. The growth rate of volume is 17.37%, and the accumulation of TAP per unit area is 100%. The index system with  $(h+3)/2$  as the core is established in order to provide new ideas and technical guidance for the follow-up tree stem shape analysis.

**Key words:** point cloud data; trunk shape change; comparative analysis; afforestation density; poplar

收稿日期: 2020-10-08 修回日期: 2020-10-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502704); 江苏省林业三新工程(LYSX[2015]19); 江苏省高校优势学科建设工程自助项目(PAPD)。

作者简介: 蒋映萱。研究方向: 遥感与 GIS 应用技术。E-mail: 2735127431@qq.com

\* 通信作者: 温小荣, 博士, 副教授。研究方向: 遥感与 GIS 应用技术。E-mail: njw9872@163.com

干形用以描述树木外部形状,与树木材积和林分蓄积量息息相关<sup>[1]</sup>。传统测量通过伐倒木分段测量来获取树木任意位置处直径,计算树木干形,并基于伐倒木数据,采用统计的方法推算大范围树木干形特征<sup>[2]</sup>。受到森林采伐限额条例限制,伐倒大量树木用于科学研究已然不大现实。近年来,随着激光雷达技术的迅速发展,研究人员将其引入林业调查之中<sup>[3-6]</sup>。

地基激光雷达(terrestrial laser scanning, TLS)通过自下而上的扫描获取点云数据,可以实现林木参数的精准提取实现对树干的详细描述<sup>[7]</sup>。目前 TLS 数据在立木干形研究中的应用主要分为 2 个方面<sup>[8-9]</sup>。一是建立干曲线方程,描述树干形状。有学者探讨了不同树种的干曲线分形维数和生长趋势,提出利用 TLS 数据进行干形研究<sup>[10]</sup>。随后大量学者尝试利用 TLS 数据绘制树干曲线,分析树干形状变化。另一种则是采用干形指标描述树木干形<sup>[11-14]</sup>,其中 TAP 是描述树干削度的较理想的干形指标<sup>[15]</sup>。

目前,科研人员不满足于对单期点云数据的分析,着眼于树木干形的动态分析,利用多期数据分析一定期间内树木干形变化<sup>[16-17]</sup>。本研究在前人研究的基础上,提出试验形率,并以此建立试验形数形率模型,用于研究区杨树形数的推导和估算;根据杨树生长特性,对树干削度指标进行调整,同时计算研究期内各干形指标变化情况,分析了树干形状变化情况。为杨树人工林科学经营提供参考,充分发挥地面激光雷达在林业动态监测中的优势。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省宿迁市泗洪县陈圩林场马浪湖分场,全区面积 800 km<sup>2</sup>,活立木蓄积 2.3 万 m<sup>3</sup>,气候适宜,水热资源充沛,植物种质资源丰富。培养了美洲黑杨(*Populus deltoides*)中南林 95 杨、南林 895 杨、南林 797 杨等优良品种,是国家首批杨树良种基地、南京林业大学杨树研究开发中心试验基地(图 1)。

### 1.2 数据来源

分别于 2017 年和 2019 年对研究区进行了 2 次测量。第 1 次测量于 2017 年冬季进行(T1),并于 2019 年进行重复调查(T2),2 次调查遵循相同的原则进行,采用相同的扫描设备与设置。使用 RIEGL VZ 400i 仪器在试验区确定的杨树标准地测站点上进行扫描,每块样地的扫描不少于 5 站。在每块样地上选取中心点,采集由中心点发出的胸径(DBH)

>5 cm、树高( $h$ )>2 m,生长匀称、没有偏冠的点云数据进行分析(图 1)。除地基激光数据外,在实地测量时,还利用直径卷尺和测高器测量了样地内树木的胸径和树高。

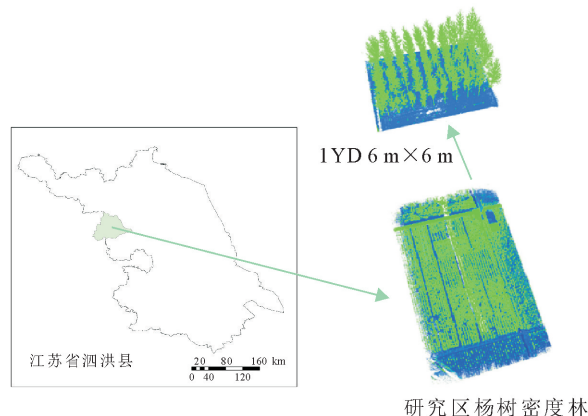


图 1 试验区位置

Fig. 1 location map of test area

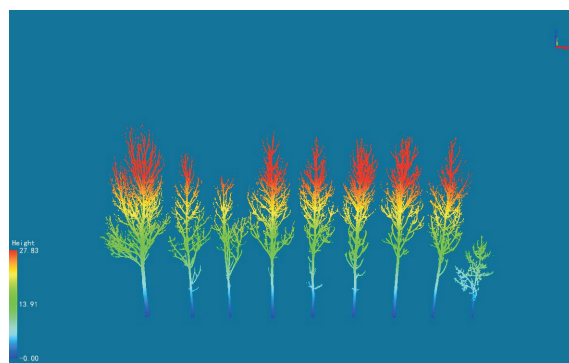


图 2 2019 年第 1 样地第 1 排示意

Fig. 2 Schematic diagram of row 1 of plot 1 in 2019

本次研究以南林速生系列中 797 杨为对象,选取 2017—2019 年一直存活的树木进行测算。最终选出 4 块不同密度样地,共计 178 棵树进行分析(图 2)。样地中树木 DBH 为 15.1~35.3 cm,  $h$  为 17.1~27.9 m(表 1)。

### 1.3 数据预处理与测量方法

由于被测物表面形状、纹理,以及气候条件等因素的影响,不可避免产生噪声点和离散点,需要对数据进行相应预处理<sup>[18]</sup>:1)通过采用人机交互的方式进行点云去噪和光顺,提升点云质量。2)借助 RiSCAN Pro 软件实现对多站点采集的局部重叠点云自动拼接。3)通过操作软件实现地形过滤,精简点云数据以便上部直径的提取。

选用迭代  $K$  均值聚类法对林分活立木进行定位和分割,每隔 1 m 对相应树高处的点云进行切片,做降维处理,采用最小二乘法提取树木直径(图 3)。树高则利用数字表面模型(DSM)和数字地形模型(DEM)做差,生成冠层高度模型(CHM)提取。

表 1 2017 年(T1)样地概况

Table 1 A survey of sample plots in 2017 (T1)

样地号	密度	株数	DBH/cm			h/m		
			Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
1	6 m×6 m	44	25.7	18.4	35.3	25.7	20.1	27.9
2	4.5 m×8 m	44	24.6	15.8	31.0	25.0	17.1	27.3
3	5m×5m	55	23.2	15.1	28.1	23.9	19.0	27.0
4	3m×8m	35	22.7	17.1	29.4	23.6	21.4	26.9
	总计	178	24.1	15.1	35.3	24.6	17.1	27.9

表 2 干形指标汇总

Table 2 Summary table of stem form indicators

名称	定义
试验形率( $q_{实}$ )	定义为 $(h+3)/2$ 处直径与胸径之比。
胸高形数( $f_{1.3}$ )	胸高断面为比较圆柱体断面时的形数,利用试验形率计算而来。
材积(VOL)	伐根以上树干的体积,利用材积三要素(树高、胸高形数、胸高处断面面积)计算。
树木削度(TAP)	胸径与不同直径测量值之差。
单位面积 TAP 累积量	TAP 负生长的树木数量占样地内树木总量的百分比
高径比(HDR)	树高与胸径的比值,用来描述树木的细长程度。

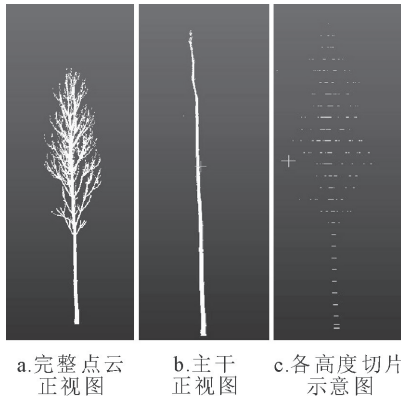


图 3 2019 年第 1 样地第 1 排第 3 株立木切片示意

Fig. 3 Slice diagram of the third tree in row 1 of plot 1 in 2019

1.4 杨树干形指标分析

经过预处理后,点云数据内包括林分内所有活立木信息,选取部分测树因子描述林木干形,分析生长变化。由于 TLS 数据可以提供准确的林木直径信息<sup>[19-20]</sup>,使得树木干形指标的测算变得便捷容易。参考试验形数数值稳定,探索 $(h+3)/2$ 处直径在计算干形指标的作用。

通过定义试验形率(式 1),根据书斯托夫提出的模型(式 2),利用 2019 年点云数据建立胸高形数与试验形率关系模型计算材积。选取一定干形指标对杨树进行树木干形分析(表 2)。

$$q_{实} = \frac{d_{(h+3)/2}}{d_{1.3}} \quad (1)$$

$$f_{1.3} = a + b * q_{实}^2 + c / (q_{实} * h) \quad (2)$$

式中, $q_{实}$ 为试验形率; $d_{(h+3)/2}$ 为 $(h+3)/2$ 处直径; $d_{1.3}$ 为胸径; $f_{1.3}$ 为胸高形数。

其中,重新设计单位面积 TAP 累积量,用以评价不同种植密度下树干削度的变化情况。单位面积 TAP 累积量愈大,表明 TAP 负生长的树木数量愈多,干形生长更加通直圆满的树木比例愈多。

对于所有干形指标中,通过测算样本树之间的变化量来评估 T1 与 T2 之间的变化,计算 T1 与 T2 之间的差值来确定它们的绝对变化;计算绝对变化量与 T1 时期的原始属性值的比值,确定它们的相对变化。

2 结果与分析

2.1 TLS 数据提取树高胸径精度分析

研究利用胸径、树高实测值检验 TLS 点云数据的提取精度。将实测值与提取值进行线性拟合,利用决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)反映拟合效果,结果显示 2 期 TLS 数据提取精度较高,拟合线性方程的决定系数( $R^2$ )均 $>0.9$ ,表明提取的树高胸径与实测值之间存在线性关系,RMSE 值较小,拟合效果良好,可将提取值用作实测值,进行后续分析(表 3,图 4)。

表 3 树高和胸径线性拟合效果

Table 3 Linear fitting effect of tree height and DBH

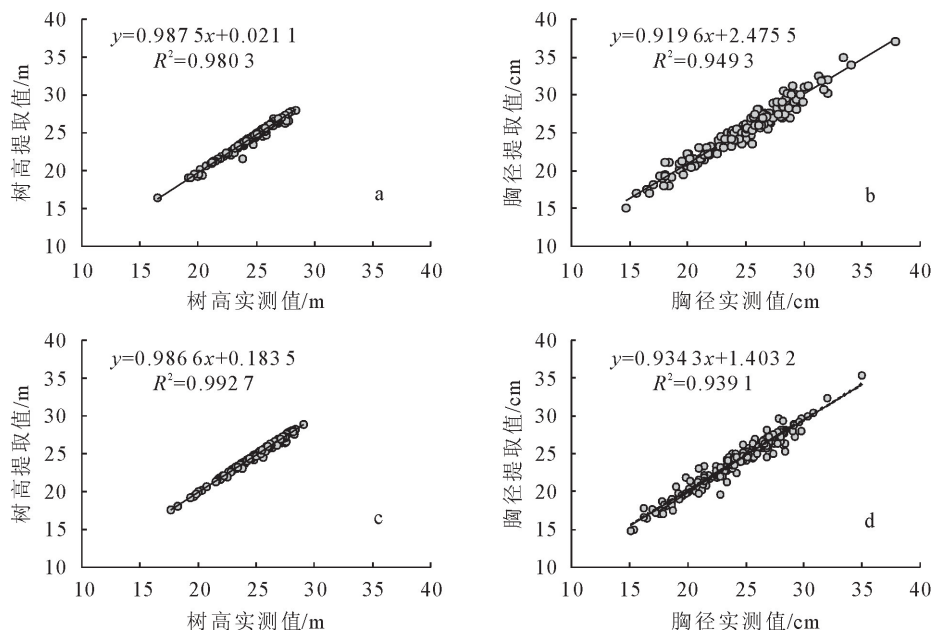
年份	测树因子	株数	$R^2$	F	RMSE
2017	树高	178	0.980 3	4 343.239 8	0.404 8
2019		178	0.992 7	2 654.076 1	0.866 8
2017	胸径	178	0.949 3	13 399.175 6	0.239 3
2019		178	0.939 1	2 489.056 5	0.997 2

2.2 形数形率模型研建

随机选取样本木中 80%的数据作为建模样本,剩余 20%作为检验样本,根据材积三要素计算材积,并采用江苏省通用的杨树二元材积模型进行检验,结果如下:

$$f_{1.3} = 0.369 + 0.115 \times q_{实}^2 + 0.286 / (q_{实} \times h) \quad (3)$$

采用决定系数,平均绝对误差(MAE),均方根误差,相对均方根误差以及乖离率(Bias)对模型结



注:a:2017 年树高;b:2017 年胸径;c:2019 年树高;d:2019 年胸径。

图 4 树高胸径提取值与实测值回归分析

Fig. 4 Regression analysis of tree height and DBH extraction value and measured value

表 4 模型计算结果分析

Table 4 Analysis table of model calculation results

模型	$R^2$	MAE	RMSE	rRMSE	Bias
形数—形率	0.773	0.25%	0.37%	0.477	0.000 14
材积	0.996	0.34%	0.63%	0.029	-0.000 95

果进行检验和评价。其中,  $R^2$  越大越好; RMSE、MAE、rRMSE、Bias 越小越好(表 4)。

由表 4 模型检验结果来看,形数形率模型和材积估计值的决定系数( $R^2$ )分别为 0.773 和 0.996,平均绝对误差(MAE)为 0.25%和 0.34%,均方根误差(RMSE)为 0.37%和 0.63%,表明基于 TLS 计算的材积具有较高的准确性和客观真实性;相对均方根误差(rRMSE)表达了标准差相对平均值的变动程度,形数形率模型略高于材积模型。乖离率(Bias)较小且接近于 0,表明预测值与实测值并未出现较大偏离<sup>[22-23]</sup>。结果表明通过定义试验形率拟合形数形率模型效果较好,可以根据调查需求合理使用该模型,为研究杨树干形参数胸高形数的测算提供参考。

2.3 基于 2 期 TLS 数据干形分析

2.3.1 基于 2 期 TLS 数据的不同造林密度下 TAP 累积量分析 根据 V. Luoma *et al*<sup>[15]</sup>,树干削度为胸径与 6 m 处直径之差,本次研究分别选用胸径与 6、7.6、9.6 m,0.382 h 以及  $(h+3)/2$  处直径进行对比,观察用以描述样本木树干削度的最优选择。采用最小二乘法提取树干上部直径,计算树木

削度,采用单位面积 TAP 累积量对结果进行分析评价。

表 5 不同直径下单位面积 TAP 累积量分析

Table 5 Analysis table of accumulation of TAP per unit area under different diameters

样地号	TAP <sub>6m</sub>	TAP <sub>7.6m</sub>	TAP <sub>9.6m</sub>	TAP <sub>0.382h</sub>	TAP <sub>(h+3)/2</sub>
1	50%	100%	90.1%	50%	100%
2	45.5%	90.1%	90.1%	90.1%	97.73%
3	72.8%	96.4%	96.4%	100%	94.55%
4	65.7%	100%	82.9%	75%	94.28%

由表 5 可知,以 6 m 的传统定义计算树木削度,6 m×6 m、4.5 m×8 m、5 m×5 m、3 m×8 m 这 4 种密度的单位面积 TAP 累积量分别为 50%、45.5%、72.8%、65.7%。表明种植密度与树木削度之间无明显联系,不符合树木生长规律。利用传统定义的 6 m 或 7.6 m、9.6 m、0.382 h 处直径计算树木削度,均无法发现不同种植密度下树木干形变化的规律。说明杨树 9.6 m 以下直径较胸径生长速度较慢,变化较小,难以准确描述树木干形变化,因此无法用 9.6 m 以下的任意一段干形变化代表样本木整体的树木干形变化。以  $(h+3)/2$  处直径作为上部直径代表,可以描述杨树 1.3 m 与  $(h+3)/2$  之间树木的削度变化,最大限度描述了杨树干形变化,可以有效代表样本木整体的干形变化。

2.3.2 基于 2 期 TLS 数据不同造林密度下材积与高径比分析 不同造林密度下测树因子变化分析结果见表 6;造林密度对树木材积生长和高径比变化



有显著影响。在同一无性系中,随造林密度的增加,材积增长量逐渐降低,表现为低密度的杨树材积增长量大于高密度杨树。分析不同样地的树木高径比变化可以发现,HDR 的相对变化率均为负,且随造林密度的增加而增大。高密度株行距配置的  $3\text{ m} \times 8\text{ m}$  的杨树在  $3\text{ m}$  方向上的生长竞争加大,树木生长空间不足,严重影响了树木材积生长和高径比变化,表现为  $\Delta\text{VOL}$  最小,为  $5.89\%$ ;而  $\Delta\text{HDR}$  最大,为  $-3.44\%$ 。

表 6 不同密度样地材积与高径比变化

Table 6 VOL and DBH in different density plots

样地	株数	密度	$\Delta\text{VOL}/\%$	$\Delta\text{HDR}/\%$
1	44	$6\text{ m} \times 6\text{ m}$	17.37	-4.24
2	44	$4.5\text{ m} \times 8\text{ m}$	8.69	-4.14
3	55	$5\text{ m} \times 5\text{ m}$	8.53	-3.58
4	35	$3\text{ m} \times 8\text{ m}$	5.89	-3.44

2.3.3 基于 2 期 TLS 数据干形变化分析 通过计算 T1 和 T2 时期的测树因子可知:TAP 的变化有正有负,负增长居多,样本树的平均 TAP 变化量为负,T2 时期的削度要  $<$  T1 时期,TPA 下降,胸径与  $(h+3)/2$  处直径大小趋于一致,树木生长趋向通直圆满(表 7)。研究区内整体的 VOL 的平均增量为  $0.057\text{ m}^3$ ,平均相对增长仅为  $10.24\%$ 。所有样本树的树高和胸径在研究期内都出现了增长,但除少量极端值之外,大部分材积生长率变化不大。这与研究区杨树的种植时间有关,研究区杨树林已经栽种 11 a,处于中龄时期,生长速度趋于平缓,因此材积增长也相较平缓。 $q_{\text{实}}$  大多轻微增加,也有极少量的负增长; $f_{1.3}$  的变化有正有负,大多为负增长,两者在研究期内变化均不明显,变化的范围也较为稳定。此外,HDR 平均变化呈现负增长,可能也与样本树的生长周期有关,树木生长中后期高生长趋于平缓,以直径粗生长为主,引起 HDR 的下降。

表 7 干形指标变化

Table 7 The changes in stem form indicators

	$\Delta\text{TAP}$	$\Delta\text{VOL}$	$\Delta q_{\text{实}}$	$\Delta f_{1.3}$	$\Delta\text{HDR}$
平均值	-0.028	0.057	0.140	-0.015	-0.039
标准差	0.020	0.064	0.072	0.015	0.042
平均相对变化	-11.59%	10.24%	38.28%	-3.05%	-3.74%

### 3 结论与讨论

分析 TLS 数据提取林分树高胸径的精度情况,2 期数据提取树高、胸径拟合线性方程的  $R^2$  均  $> 0.9$ ,RMSE 较小。显然 TLS 数据提取值可以代替实测值,用以后续分析。此外,基于 TLS 数据通过

定义试验形率,探索了基于 TLS 数据提取林木参数的杨树形数形率模型,其中  $R^2$  为  $0.773$ ,MAE 为  $0.25\%$ ,RMSE  $0.37\%$ ,rRMSE 为  $0.477$ ,Bias 为  $0.00014$ 。显然试验形率可以较好地代替胸高形率,应用于林业调查中胸高形数的预测,为分析杨树干形参数提供参考。

在对比各高度直径后发现选用胸径与  $(h+3)/2$  处直径作为最具代表的下部直径与上部直径,计算 TAP 和 TAP 累积量最为合理,可以准确代表样本树的树木干形变化。分密度对林木干形进行分析显示,TAP 累积量和材积变化量随造林密度增加而降低,高径比变化量随造林密度增加而增加,树木干形趋于尖削。

通过对研究区样本干形进行分析,发现样本树的平均 TAP 变化量为负,胸径与  $(h+3)/2$  处直径大小趋于一致,树木生长趋向通直圆满;样本树的材积有所增长,但增长率变化不大; $q_{\text{实}}$  和  $f_{1.3}$  在研究期内变化均不明显,变化的范围也较为稳定。此外,HDR 平均变化呈现负增长,可能与样本树的生长周期有关,树木生长中后期高生长趋于平缓,以直径粗生长为主,引起 HDR 的下降。

相较于传统干曲线严谨复杂的计算方法,TAP 更加方便易算,用以代替连续的曲线方程,近似描述树木干形变化。但需注意的是,对于 TAP 和 TAP 累积量,其精确提取是树木干形变化分析的关键。研究中存在少数例外的观察结果。这可能是树木位置或周围树木对其生长产生了影响,例如外力导致树梢折断或生长阶段不同对树高、胸径增量的影响等。基于本试验结果,需要进一步探究不同无性系、不同发育阶段对树木材积增长和干形变化的影响,以便详细了解这一问题。

### 参考文献:

- [1] 付立华,于士涛,程顺,等.塞罕坝地区华北落叶松干形特征研究[J].林业与生态科学,2018,33(3):264-269.
- [2] 杨玉泽,张珊珊,林文树.依据地面三维激光扫描及点云数据建立的白桦树干削度方程[J].东北林业大学学报,2018,46(12):58-63.  
YANG Y Z,ZHANG S S,LIN W S. Stem taper function of *Betula platyphylla* with terrestrial 3D laser scanning[J]. Journal of Northeast Forestry University,2018,46(12):58-63. (in Chinese)
- [3] CABO C,ORDÓÑEZ C,LÓPEZ-SÁNCHEZ C A,et al. Automatic dendrometry: tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning[J]. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation,2018,69,164-174.
- [4] LIANG X,KANKARE V,HYYPÄ J,et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories [J]. ISPRS J. Photogramm.

- Sens., 2016, 115, 63-77.
- [5] 翟晓晓, 邵杰, 张昊明, 等. 基于移动 LiDAR 点云的树木三维重建[J]. 中国农业信息, 2019, 31(5): 84-89.
- [6] PITKÄNEN T P, RAUMONEN P, KANGAS A. Measuring stem diameters with TLS in boreal forests by complementary fitting procedure[J]. ISPRS J. Photogramm. Sens., 2019, 147, 294-306.
- [7] 罗旭, 程承旗. 基于三维激光扫描成像系统的树木干曲线的分形特征[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 401-405.  
LUO X, CHENG C Q. Fractal characteristic of stem curve based on the 3-D Laser scanning imaging system[J]. Study on Soil and Water Conservation, 2007, 14(5): 401-405. (in Chinese)
- [8] 夏明鹏, 官凤英, 范少辉, 等. TLS 技术在森林资源调查中的应用现状与展望[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 238-244.  
XIA M P, GUAN F Y, FAN S H, *et al.* Application status and prospect of TLS in forest resources inventory[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 238-244. (in Chinese)
- [9] 段勋军, 刘美爽. 基于 PROSAC 算法的 TLS 林分树干提取研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 226-231, 256.  
DUAN X J, LIU M S. Tree trunk extraction of the stand based on TLS of PROSAC algorithm[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 226-231, 256. (in Chinese)
- [10] 梁子瑜. 基于 TLS 点云数据的林分调查因子测定及收获估计[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [11] 尤磊. 基于点云数据的树干干形测量[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [12] 李元. 红松人工林树干削度方程的研究[J]. 绿色科技, 2017(17): 87-91.
- [13] 马岩岩, 姜立春. 基于非线性分位数回归的落叶松树干削度方程[J]. 林业科学, 2019, 55(10): 68-75.  
MA Y Y, JIANG L C. Stem taper function for *Larix gmelinii* based on nonlinear quantile regression[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(10): 68-75. (in Chinese)
- [14] LIANG X, HYYPPÄ J, KAARTINEN H, *et al.* Detecting changes in forest structure over time with bi-temporal terrestrial laser scanning Data[J]. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2012, 1, 242-255.
- [15] LUOMA V, SAARINEN N, KANKARE V, *et al.* Examining Changes in Stem Taper and Volume Growth with Two-Date 3D Point Clouds[J]. MDPI, 2019, 10(5): 382.
- [16] SRINIVASAN S, POPESCU S C, ERIKSSON M, *et al.* Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change[J]. Ecol. Manag., 2014, 318: 304-317.
- [17] SHEPPARD J, MORHART C, HACKENBERG J, *et al.* Terrestrial laser scanning as a tool for assessing tree growth[J]. iForest-BiogeoSci. For., 2016, 10, 172.
- [18] 俞浩. 基于点云数据的预处理算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [19] 刘雪惠. 基于地基激光数据的林木参数提取及建模分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [20] 顾海波, 熊子月, 温小荣, 等. 基于地基激光数据的杨树树干形分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(6): 72-77.  
GU H B, XIONG Z Y, WEN X R, *et al.* Analysis of poplar stem form based on terrestrial laser scan[J]. Journal of Central South University of Forestry Science & Technology, 2019, 39(6): 72-77. (in Chinese)
- [21] 孟宪宇, 余光辉, 李凤日, 等. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [22] 徐诗宇, 施拥军, 冯晟斐. 基于三维激光点云的城市绿化树种材积及树干碳储量无损精确测算[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(6): 1062-1069.  
XU S Y, SHI Y J, FENG S F. Nondestructive and accurate measurement of volume and stem carbon storage for urban greening tree species based on terrestrial laser scanning point cloud[J]. Journal of Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2018, 35(6): 1062-1069. (in Chinese)
- [23] 裴魏魏, 倪海明, 戚大伟. 基于 B 样条算法的树干表面形貌三维重建研究[J]. 森林工程, 2019, 35(5): 57-62.  
PEI W W, NI H M, QI D W. Three dimension reconstruction study of tree trunk surface shape based on B-spline algorithm[J]. Forest Engineering, 2019, 35(5): 57-62. (in Chinese)