

# 基于 SLAM 点云的杨树参数提取 及生物量估算模型研究

童昊哲<sup>1</sup>, 费鲜芸<sup>1\*</sup>, 王 圳<sup>2</sup>, 高亚军<sup>2</sup>, 杨伟伟<sup>1</sup>, 严 鸿<sup>1</sup>

(1. 江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005; 2. 连云港林业技术指导站, 江苏 连云港 222002)

**摘要:**传统的生物量计算模型是在地面调查基础上, 基于胸径和树高而建立。随着激光雷达技术的发展, 树木的冠幅成为更易获取的参数, 加入冠幅参数建立的树木生物量计算模型更具有实际应用价值。目前没有明确针对连云港杨树的生物量估算模型, 为了基于冠幅计算连云港杨树生物量, 该研究使用飞马 SLAM100 搭载背包平台 (SLAM-BP) 对 4 个杨树样地 (16 m×50 m) 进行数据采集, 通过去噪、单木分割等处理提取胸径、树高和冠幅等单木因子, 在分析地面实测数据和点云测量数据基础上, 分析 3 种单木因子之间的关系, 并建立包括冠幅因子在内的 4 种模型计算生物量, 分别与异速生长模型进行比较, 结果表明: (1) SLAM 点云数据提取的单木因子与地面实测数据之间有很高的相关性,  $R^2$  均高于 0.9, 可以有效提取杨树的林木参数; (2) 杨树冠幅与胸径、树高之间有明显的相关性, 冠幅与胸径的相关性比冠幅与树高的相关性更强, 为模型建立与分析提供了坚实基础; (3) 利用冠幅建立模型计算生物量具有较好的精度, 但进一步增加胸径或树高可以有效提高模型的精度, 同时增加二者后模型精度最高。相关模型的建立为利用地面或者无人机点云数据计算杨树生物量提供了技术支持。

**关键词:** SLAM; 杨树; 单木因子; 生物量; 模型; 连云港

**中图分类号:** S718.55<sup>+</sup>6; S758.5<sup>+</sup>1; S792.11 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-7380.2024.05.003

## LiDAR data extraction and biomass model of poplar based on SLAM point cloud

Tong Haozhe<sup>1</sup>, Fei Xianyun<sup>1\*</sup>, Wang Zhen<sup>2</sup>, Gao Yajun<sup>2</sup>, Yang Weiwei<sup>1</sup>, Yan Hong<sup>1</sup>

(1. College of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

2. Lianyungang Forestry Technology Guidance Station, Lianyungang 222002, China)

**Abstract:** The traditional forest biomass calculation model is established based on the ground survey of tree DBH and height. With the development of LiDAR technology, the crown width of trees has become more easily obtained, and the tree biomass calculation model established by crown width involvement has more practical application value. In order to calculate the biomass of poplar in Lianyungang, the Pegasus SLAM100 backpack platform (SLAM-BP) was used to collect data from four poplar sample plots (16 m×50 m), individual tree factors such as DBH, tree height and crown width were extracted through denoising and single tree segmentation, and the relationship was analyzed between the three factors of tree based on ground measurement data and point cloud measurement data. The results showed that: (1) The single tree factor extracted from SLAM point cloud data had a high correlation with the ground measured data, with  $R^2$  higher than 0.9, competent to extract the tree parameters of poplar; (2) there was a significant correlation between the crown width and both DBH and tree height of poplar, and the correlation between crown width and DBH was stronger than that between crown width and tree height, which provided a solid foundation for the model establishment and analysis. (3) The model by use of crown width to establish had good accuracy to calculate biomass, but further involvement of either tree DBH or height could effec-

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-08-27

**基金项目:** 连云港市科技局项目“基于遥感技术的杨树农田防护林碳汇能力估算研究”(SF2240); 国家自然科学基金项目“高分辨率遥感影像植被纹理特征对三维绿量的表达研究”(31270745)

**作者简介:** 童昊哲 (2000-), 男, 重庆铜梁人, 硕士研究生, 工学学士。主要从事林业遥感研究。E-mail: 1292283655@qq.com

**\* 通信作者:** 费鲜芸 (1969-), 女, 山东烟台人, 教授, 博士。主要从事城市植被遥感等研究。E-mail: hhifxy@163.com

tively improve the model accuracy, and the accuracy could reach the highest at both participation. The establishment of the relevant model could provide technical support for the calculation of poplar biomass using ground or UAV point cloud data.

**Key words:** SLAM; Poplar; Single wood factor; Biomass; Model; Lianyungang

森林生物量是衡量森林健康和生态功能的关键指标<sup>[1]</sup>,是森林资源管理中不可或缺的数据。杨树作为连云港的重要经济林木,具有生长快、成材早、抗逆性好等特点<sup>[2]</sup>。但近年来该地杨树林密度有所下降<sup>[3]</sup>,这不仅影响区域生态平衡,也对当地经济产生了负面影响。因此,准确了解连云港杨树的生长状况,并构建合适的生物量预估模型,对促进连云港杨树林的合理经营和科学管理具有重要意义。

传统的森林生物量调查主要依赖于地上生物量(Aboveground Biomass,简称 AGB)的测量,如全树收获法<sup>[4]</sup>,即将整株树伐倒后测量其不同部分(如树干、枝条、叶子)的质量。这种方法虽然精确,但耗时且对森林生态造成破坏。为此,研究者们开始利用易获取参数(如胸径、树高)来进行生物量估算<sup>[5]</sup>。如 Chave 等<sup>[6]</sup>构建涉及胸径的回归模型;金钟跃等<sup>[7]</sup>在此基础上加入树高因子,建立落叶松的全株生物量模型。然而,单纯依赖胸径与树高因子的模型在不同地区存在误差<sup>[8]</sup>。因为它们未能全面反映树木的生长信息。冠幅作为反映树木在水平空间上占据面积的重要参数,可以补充胸径和树高模型中的信息缺失。将冠幅纳入生物量估算模型可以提高精度<sup>[9]</sup>。然而,传统的林木参数获取方式难以在大规模、复杂地形的森林中高效应用。

近年来,激光雷达扫描技术在森林信息收集、参数提取方面发展迅速<sup>[10]</sup>。特别是结合 SLAM 技术(同时定位与地图构建,Simultaneous Localization And Mapping)的激光雷达能够在移动中实时构建三维地图。SLAM 技术是通过激光传感器感知周围的环境,并将不同时刻感知的环境进行匹配套合,从而反推本体在环境中的位置及运动轨迹<sup>[11]</sup>。这一优势使其能在全球卫星导航系统(GNSS)信号弱的复杂森林环境中生成高精度的点云数据<sup>[12]</sup>。点云数据是由激光雷达通过发射激光脉冲并记录反射信号,生成由大量代表森林中每个物体表面的点组成,每个点具有精确的三维坐标,可构建出整个森林的三维结构图。通过对点云数据进行分析处理,可以精确快速地提取树木的胸径、树高和冠幅等林木参数。如赵琦等<sup>[13]</sup>利用背包激光雷达较快地提

取了桉树、马尾松等林木的单木因子, $R^2$ 平均约为 0.8,将这些林木参数与实测生物量进行拟合,构建了生物量预估模型。如张振东等<sup>[14]</sup>在利用机载激光雷达提取单木因子的基础上,构建了针对钦州湾红树林的生物量计算模型,并通过模型检验显示其  $R^2$  大于 0.65,证明了模型的可靠性。

目前的研究中,对杨树的生物量计算模型构建大都依赖于树高与胸径,但没有明确针对连云港地区杨树的生物量估算模型。为此,本研究提出利用 SLAM 技术非破坏性地获取林木参数,基于冠幅逐步引入胸径和树高等参数构建连云港地区杨树的生物量估算模型。通过这种方法,旨在为连云港地区的杨树森林资源管理提供精确的生物量估算工具,支持碳储量计算和生态研究,并为 SLAM 技术在森林资源调查中的进一步应用提供实践基础,也为未来当地杨树生物量估算模型的拓展和应用奠定基础。

## 1 研究区概况

研究区位于江苏省连云港市灌云县(34°00'N—34°30'N,119°00'E—119°30'E)和东海县(34°11'—34°44'N,118°23'—119°10'E)境内。杨树种植密度均匀,杨树树种多为意大利杨(*Populus × canadensis*)和黑杨(*P. nigra*),占连云港杨树林近 1/3。连云港地处中国东南沿海,属于温带季风气候区域,夏季炎热潮湿,冬季寒冷干燥,年降水量为 800 mm 左右,相对湿度为 64%—80%。杨树在这样的气候条件下具有较强的适应性,可以在较短时间内形成可用于木材生产的成熟林。

## 2 研究方法

### 2.1 样本选取

为确保全面提取杨树单木因子,建立的生物量估算模型有实际意义,选取的样本涵盖连云港市不同树龄的杨树;其次,样木的生长状况具有代表性,树干笔直,树形整齐,主干通直;最后,样地内杂草处于枯萎状态,树冠之间遮挡较少。因此,在灌云县新沂河北侧研究区和东海县黄石线北侧研究区分别选取 2 块样地,4 块样地面积均为 0.18 hm<sup>2</sup>(36

m×50 m)。

### 2.2 样地单木因子实地测量

2024 年 3—4 月,对样地内林木进行编号和每木检尺,根据《森林测量》<sup>[15]</sup> 中的方法分别测量杨树的树高、胸径和冠幅。根据测距仪和测高仪的数据,测量树高;用胸径尺在树干高 1.3 m 处(胸高处)紧贴树皮水平环绕树干进行测量,读取尺上的刻度,记录胸径;用测距仪记录树冠的 2 个最大宽度方向,在这 2 个方向上使用测距仪测量从树干到树冠边缘的距离,记录测量值,计算平均值作为冠幅。样本实测信息统计如表 1 所示。

表 1 样本信息统计

杨树树龄	株数	胸径平均值/cm	树高平均值/m	冠幅平均值/m
成熟林	94	26.46	19.91	6.93
中龄林	90	14.54	17.09	4.18
幼龄林	116	8.12	9.46	3.05

### 2.3 基于 SLAM 点云的单木因子获取

2.3.1 样地点云数据采集 每木检尺结束后以具有标志性的样本为起点,记录各个杨树相对位置,使用 SLAM-BP(飞马 SLAM100 搭载背包平台),采用逐行式路径规划进行样地激光点云数据采集。

2.3.2 点云数据预处理 根据样本相对位置对点云数据进行裁剪获取样地位置后,进行去噪、地面点滤波和归一化处理,通过分析点与其邻近点的空间关系识别并去除噪声点<sup>[16]</sup>;地面点滤波通过构建和逐步优化三角网结构来区分地面点与非地面点<sup>[17]</sup>;地面点归一化使用反距离权重(IDW)插值方法<sup>[18]</sup>调整点云数据,以反映实际地形。

2.3.3 单木分割及单木因子提取 采用区域生长分割算法<sup>[19]</sup>在样地进行单木分割(如图 1);使用最小二乘圆拟合法<sup>[20]</sup>计算胸径;通过计算分割区域的垂直范围提取树高;计算树冠区域的水平范围(从最左到最右的距离)提取冠幅。

### 2.4 单木因子生长关系

单木因子之间存在明显的生长关系,利用 Origin2024 软件中的非线性拟合功能,基于对数据分布特征的初步分析分别建立了冠幅与胸径、冠幅与树高以及胸径与树高之间的关系模型。

### 2.5 生物量测定方法

由于样地旁有小麦种植田,杨树对其有防风固沙和水土保持的作用,对杨树林保护较为严格,且

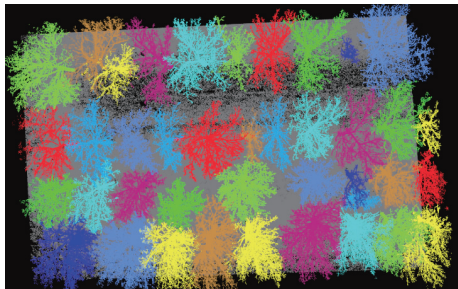


图 1 分割效果

砍伐具有破坏性。因此使用异速生长方程<sup>[21]</sup>计算实测样地生物量,选取其中泛用性最强的表达式(1),并根据样本区单木因子实地测量中获得的胸径与树高来计算地上生物量(AGB)。

$$W_{AGB} = 0.0419(D^2H)^{0.9154} \quad (1)$$

式中, $W_{AGB}$ 为地上生物量(单位:t); $D$ 为胸径(单位:cm); $H$ 为树高(单位:m)。

### 2.6 生物量预估模型

2.6.1 基础模型选取 刘沁茹等<sup>[22]</sup>研究表明非线性模型(幂函数模型)能更好地呈现森林生物量和地表参数间的关系。参考 Shi 等<sup>[23]</sup>对生物量模型的研究,建立基于冠幅的生物量基础模型(见表 2)。

2.6.2 模型评价与检验 对本研究 300 个样本进行随机抽取,75%用于建模,其余 25%用于模型检验。通过决定系数  $R^2$  和均方根误差  $RMSE$  评价模型拟合能力和单木因子提取精度, $R^2$  越大, $RMSE$  越小,拟合效果越好。采用平均相对误差绝对值( $RMAE$ )和平均绝对误差( $MAE$ )作为检验评价指标,二者越小,检验效果越好。

表 2 基础模型方程<sup>[23]</sup>

模型编号	基础模型方程	适用条件
1	$AGB = a(CW)^b$	仅获取冠幅
2	$AGB = a(D)^b(CW)^c$	同时获取胸径与冠幅
3	$AGB = a(H)^b(CW)^c$	同时获取树高与冠幅
4	$AGB = a(H)^b(D)^c(CW)^d$	同时获取 3 个单木因子

注:AGB 为地上生物量(单位:t); $D$ 为胸径(单位:cm); $H$ 为树高(单位:m); $CW$ 为冠幅(单位:m)

## 3 结果与分析

### 3.1 单木因子提取精度

使用 Origin2024 软件对提取的 300 株样本树高、胸径和冠幅与其实测值进行回归关系分析(见图 2)。3—4 月当地杨树叶片未完全展开,地面杂



灌少,通视条件良好,提取数据与实测数据之间均有较强的相关性, $R^2$ 均大于0.9;胸径的提取精度整体大于树高与冠幅的提取精度。结果显示提取胸径与实测值之间的 $R^2$ 为0.962, $RMSE$ 为0.017 m;提取树高与实测值之间的 $R^2$ 为0.957, $RMSE$ 为

1.001 m;提取冠幅与实测值之间的 $R^2$ 为0.911, $RMSE$ 为0.644 m。证明SLAM技术可以对杨树进行高精度单木因子提取,这为后续建立生物量预估模型提供合理数据。

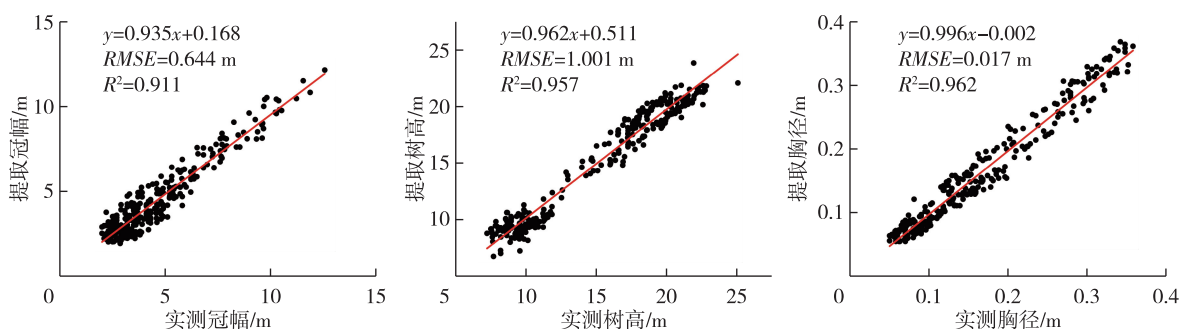


图2 单木因子提取结果

### 3.2 单木因子生长关系分析

图3展示了提取的单木因子之间的生长关系:冠幅与胸径之间的关系较为紧密,说明胸径不仅影响树高,还与树冠的扩展密切相关,在生物量模型中,加入胸径可能会提高模型的精度;尽管树高与冠幅之间的相关性较弱,但仍然存在一定的生长规律,这可能与树木生长过程中冠幅的扩展更多地受环境条件(如光照、空间竞争等)影响有关;随着胸径的增加,树高的增长率趋于稳定,说明胸径可以

作为预测树高的有效指标,表明使用生物量测定方法中的表达式(1)获取实际生物量的方式可靠。

综上所述,冠幅与胸径、树高之间有较高生物量测定方式的相关性,显示出杨树生长过程中这些因子之间的紧密联系。这些生长关系分析为后续的基于冠幅生物量估算模型构建提供了坚实的数据基础,并进一步验证了SLAM技术在提取单木因子时的高精度和可行性。

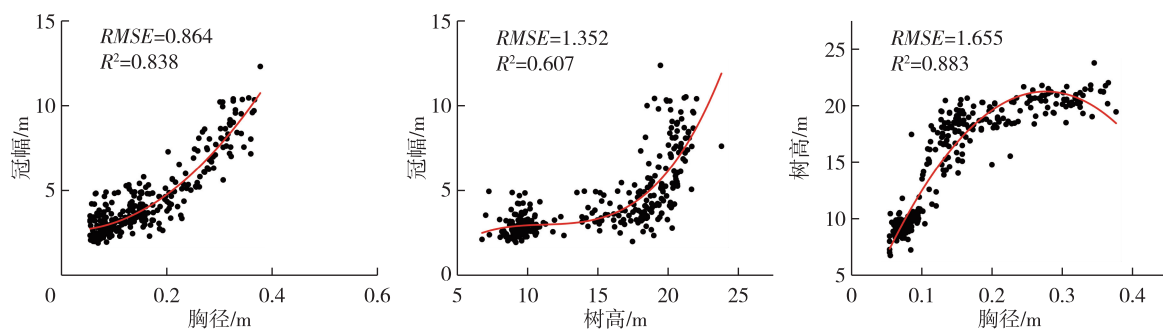


图3 单木因子生长关系

### 3.3 杨树生物量估算模型评价

将300株样本的提取结果按照3:1的比例随机划分为建模数据和检验数据,并将实测树高和实测胸径代入表达式(1),作为样本的实际生物量。利用R软件对选取的4个基础模型进行拟合与检验。表3、4分别为各模型的拟合结果与检验结果。整体来看,各生物量模型 $R^2$ 均大于0.7, $RMAE$ 平均为0.325, $MAE$ 平均为0.034 t,证明各个模型均有良好的拟合效果与预测能力。其中,虽然仅用冠幅参数

的模型1预测效果不如多参数模型,但在利用无人机进行大规模森林资源调查中,模型1具有测量简便的显著优势,其能快速评估森林资源、估算碳储量<sup>[24]</sup>,这相较于使用胸径与树高的异速生长方程(表达式1)更具优势,并为进一步研究和改进树木生物量预测模型奠定了基础;加入胸径参数的模型2预估精度有明显提升,这与SUN等<sup>[25]</sup>研究结果一致;虽然模型3的 $R^2$ 为0.868,略低于模型2,但仍然表现出较好的预测效果,在精确估算单株树木生

物量时具有优势<sup>[26]</sup>;在模型 3 的基础上加入胸径因子之后(模型 4),模型的预估准确性有明显提升,该模型综合了 3 个主要的林木参数,表现出最高的预测精度( $R^2=0.967$ , $RMSE=0.022\text{ t}$ ),若结合无人

与地面采集数据,可以提供相对高精度的生物量估算<sup>[27]</sup>。

综上所述,基于冠幅的生物量模型预测精度较高,这为针对连云港杨树森林生物量估算提供了新方法。

表 3 模型拟合结果

模型编号	参数	估计值	标准误差	<i>P</i>	$R^2$	$RMSE/t$
1	a	9.492 4	1.729	<0.001	0.731	0.065
	b	1.616 7	0.902 5	<0.001		
2	a	0.474 4	0.069 2	<0.001	0.957	0.026
	b	1.961 5	0.060 7	<0.001		
	c	-0.066 5	0.047 1	0.007		
3	a	0.002 3	0.001 7	0.04	0.868	0.044
	b	3.37	0.258 3	<0.001		
	c	0.793 1	0.064 3	<0.001		
4	a	0.048 2	0.017 02	0.005	0.967	0.022
	b	1.124 6	0.146	<0.001		
	c	1.601 9	0.066 6	<0.001		
	d	-0.009	0.042 3	0.03		

表 4 模型检验结果

模型编号	样本个数	$RMAE$	$MAE/t$
1	75	0.44	0.052
2	75	0.31	0.022
3	75	0.35	0.041
4	75	0.2	0.019

4 结语

单木因子提取结果显示,提取的胸径、树高和冠幅与实测数据有较高的相关性, $R^2$ 均高于 0.9。胸径提取精度最高, $R^2$ 为 0.962, $RMSE$ 为 0.017 m,这与杨军等<sup>[28]</sup>对蒙古栎胸径提取的研究结果一致;树高  $R^2$ 为 0.957, $RMSE$ 为 1.001 m,冠幅  $R^2$ 为 0.911, $RMSE$ 为 0.644 m,这与黄旭等<sup>[29]</sup>对落叶松单木因子提取结果基本一致,但本研究的树高提取结果更优。由于数据采集在春季进行,避免了杂草和树冠遮挡影响,采集到的点云数据较为全面,单木因子的提取精度能满足生产需求。生物量模型建立的结果显示,基于冠幅的生物量模型拟合效果和检验效果均较好,各模型均有其实际应用价值。未来研究将扩大样本数量,结合 GF-2 遥感影像特征优化模型,提升生物量模型估算能力。

总的来说,本研究利用 SLAM-BP 提取的单木因子与实测值高度相关,充分验证了 SLAM 技术在人工森林环境下的高效性和精度。基于冠幅构建的

生物量预估模型展示了极高的精度和实用性,在加入其他参数后,模型的预测能力得到了显著提升。这一创新性方法不仅为连云港地区杨树的生物量估算提供了可靠工具,还为 SLAM 技术在森林资源管理与保护中的应用奠定了坚实基础。

参考文献:

[1] 曹 林,余光辉,代劲松,等.激光雷达技术估测森林生物量的研究现状及展望[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(3):163-169.

[2] 马丽娜,尹鹏飞,韩月明,等.杨树农田防护林枯落物对 5 种植物种子萌发的影响[J].防护林科技,2023(2):56-58.

[3] 宋俊山,王 圳,丛日杰,等.连云港市杨树纯林生态服务功能价值评估[J].江苏林业科技,2016,43(1):1-4,14.

[4] BROWN S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1997.

[5] NAVAR J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(2): 427-434.

[6] CHAVE J, ANDALO C, BROWN S, et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests [J]. Oecologia, 2005, 145: 87-99.

[7] 金钟跃,贾玮玮,刘 微.落叶松人工林生物量模型研究[J].植物研究,2010,30(6):747-752.

[8] 李振华,王可星,高 畅.项城市行道树种类组成及碳储量空间分布探析[J].现代园艺,2024,47(11):48-52.

[9] GOODMAN R C, PHILLIPS O L, BAKER T R. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates[J].

- Ecological Applications, 2014, 24(4): 680-698.
- [10] HU T Y, SUN X L, SU Y J, et al. Development and performance evaluation of a very low-cost uav-lidar system for forestry applications[J]. Remote Sensing, 2020, 13(1): 77.
- [11] 杨学林.手持激光雷达扫描仪飞马在地形测绘中的运用[J].科技创新与应用, 2024, 14(10): 26-29.
- [12] SHAO J, ZHANG W M, MELLADO N, et al. SLAM-aided forest plot mapping combining terrestrial and mobile laser scanning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 163: 214-230.
- [13] 赵琦, 李震, 陈丽华, 等.基于背包式激光雷达的林木胸径和树高提取[J].林业调查规划, 2022, 47(4): 18-22.
- [14] 张振东, 田义超, 邓静雯, 等.基于激光雷达的钦州湾典型红树林生物量反演[J].生态科学, 2024, 43(1): 203-210.
- [15] KERSHAW J A, DUCEY M J, BEERS T W, et al. Forest mensuration[M]. Chichester: Wiley/Blackwell, 2017.
- [16] RUSU R B, COUSINS S. 3D is here; Point Cloud Library (PCL)[J]. IEEE, 2011: 1-4.
- [17] AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 23(B4): 110-117.
- [18] IBRAHIM A M, NASSER R H A. Comparison between inverse distance weighted (IDW) and Kriging[J]. International of Science and Research, 2017, 6(11): 249-254.
- [19] ZHEN Z, QUACKENBUSH L J, STEHMAN S V, et al. Agent-based region growing for individual tree crown delineation from airborne laser scanning (ALS) data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(7): 1965-1993.
- [20] 刘珂, 周富强, 张广军. 半径约束最小二乘圆拟合方法及其误差分析[J]. 光电子·激光, 2006(5): 604-607.
- [21] 刘建峰, 倪健. 我国主要树种类型通用生物量相对生长方程的建模比较[J]. 第四纪研究, 2021, 41(4): 1169-1180.
- [22] 刘沁茹, 孙睿. 森林生物量遥感降尺度研究[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3967-3977.
- [23] SHI L, LIU S R. Methods of estimating forest biomass: A review[J]. Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy, 2017, 10: 65733.
- [24] TIAN J Y, WANG L, LI X J, et al. Canopy height layering biomass estimation model (CHL-BEM) with full-waveform LiDAR[J]. Remote Sensing, 2019, 11(12): 1446.
- [25] SUN X, WANG X C, WANG C K, et al. Filling the "vertical gap" between canopy tree species and understory shrub species: biomass allometric equations for subcanopy tree species[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 34(4): 903-913.
- [26] TIAN L, WU X C, TAO Y, et al. Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation: Progress, challenges, and prospects[J]. Forests, 2023, 14(6): 1086.
- [27] DEMIE G, NEGASH M, ASRAT Z, et al. Species specific and multi-species allometric models for estimating aboveground biomass of native perennial plant species grown in the agricultural landscape of Central Ethiopia[J]. Agroforestry Systems, 2024, 98(1): 179-196.
- [28] 杨军, 王帆, 宋仲禹. 基于背包激光雷达构建天然林蒙古栎胸径-树高模型[J]. 森林工程, 2023, 39(5): 57-64.
- [29] 黄旭, 贾玮玮, 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.

(上接第13页)

众对皂角保护意识, 制定相应措施, 通过植树造林等方式, 增加幼树数量, 进一步稳固黔东南州皂角种群结构。

#### 参考文献:

- [1] 钟章成. 我国植物种群生态研究的成就与展望[J]. 生态学报, 1992(1): 6-10.
- [2] 谢宗强, 陈伟烈, 路鹏, 等. 濒危植物银杉的种群统计与年龄结构[J]. 生态学报, 1999(4): 523-528.
- [3] 拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6871-6882.
- [4] 杨彪, 张全建, 龚旭, 等. 雅砻江冬麻豆(*Salweenia bouffordiana*)种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1184-1194.
- [5] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4272-4279.
- [6] 中国科学院. 中国植物志: 第39卷 被子植物门双子叶植物纲豆科皂荚属[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 80-86.
- [7] 韩丽君. 果用皂荚优良无性系选育研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(20): 22-30.
- [8] 谭菊荣, 袁位高, 李婷婷, 等. 极小种群野生植物细果秤锤树种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3678-3687.
- [9] 吴其超, 臧凤岐, 李呈呈, 等. 濒危树种五莲杨种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5016-5025.
- [10] 冯士雍. 生存分析[J]. 数学的实践与认识, 1982(3): 72-80.
- [11] 赵鹏, 徐先英, 张裕年, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭种群年龄结构及动态[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 6069-6079.
- [12] 陈晓德. 植物种群与种群结构动态亮化分析方法研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 214-217.
- [13] 肖宜安, 何平, 李晓红, 等. 濒危植物长柄双花木自然种群数量动态[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 252-257.
- [14] DEEVEY E S JR. Life tables for natural populations of animals[J]. The Quarterly Review of Biology, 1947, 22(4): 283-314.
- [15] 杨立荣, 张治礼, 云勇, 等. 濒危植物海南龙血树的种群结构与动态[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2802-2815.
- [16] 井赛, 张静, 侯晓巍, 等. 三江源东部祁连圆柏天然更新特征研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 52-58.
- [17] 朱国飞. 乌弄龙水电站景观绿化及植被恢复规划设计研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(6): 105-111.