

星载激光雷达估测森林结构参数研究现状分析与展望

黄佳鹏^{1,2} 李国元^{1,2} 刘 诏²

(1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000;

2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048)

摘要: 星载激光雷达系统可以覆盖机载系统难以到达的偏远地区,从机理上克服光学影像及合成孔径雷达测量的技术缺陷,为快速准确地获取林下地形、树高、生物量等森林结构参数提供了可靠的数据源。对现有的星载激光雷达技术观测体系进行综述,讨论了星载激光雷达数据估测多尺度森林结构参数的适用性,量化分析现有星载激光雷达研究成果及存在的优缺点。最后,总结当前存在的问题,对星载激光雷达技术未来的前景和发展方向进行了展望。建议后续研究可进一步加大对反演不同森林结构参数、产品体系及标准规范、林业应用精度评价、林业用激光雷达参数设计等方面的深入研究。

关键词: 森林结构参数; 星载激光雷达; 多尺度; 多源数据

中图分类号: S75

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0018-16

OSID:



Current Status and Development Trend in Estimating Forest Structural Parameters with Spaceborne LiDAR

HUANG Jiapeng^{1,2} LI Guoyuan^{1,2} LIU Zhao²

(1. School of Geomatics, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, China

2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: The spaceborne LiDAR measurement system offers a solution by covering remote areas that are challenging to access via airborne systems. This system effectively addresses the technical limitations of optical imaging and synthetic aperture radar measurements, thereby providing a reliable data source for swiftly and accurately obtaining forest structure parameters. However, the existing review on applications of spaceborne LiDAR has a lack of analysis that measures the accuracy of forest structural parameters estimated by spaceborne LiDAR as a whole and the content of the analysis is not systematic. The existing spaceborne LiDAR technology observation system were initially reviewed, and then the applicability of spaceborne LiDAR data estimation for multi-scale forest structure parameters was explored. The current development trends, as well as the existing advantages and disadvantages of satellite-borne LiDAR were also analyzed. Finally, the current challenges and anticipates the future prospects and development directions of spaceborne LiDAR technology were summarized. The research result can serve as a valuable reference for the design and application of spaceborne LiDAR remote sensing satellites in forestry. It was suggested that further research can deepen the in-depth study on the inversion of different forest structure parameters, product systems and standard specifications, accuracy evaluation of forestry applications, and design of LiDAR parameters for forestry.

Key words: forest structure parameter; spaceborne LiDAR; multi-scale; multi-source data

收稿日期: 2024-01-21 修回日期: 2024-03-20

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目(JYTQN2023202)、辽宁省博士科研启动基金计划项目(2023-BS-202)、国家重点研发计划项目(2020YFA0608501、2021YFE0117700)和兴辽人才计划项目(XLYC1802027)

作者简介: 黄佳鹏(1993—),男,副教授,博士,主要从事星载激光雷达理论 and 应用研究,E-mail: huangjiapeng@lntu.edu.cn

通信作者: 李国元(1984—),男,研究员,博士,主要从事卫星激光测高方面研究,E-mail: ligy@lasac.cn

0 引言

森林作为陆地生态系统的重要组成部分^[1],在全球碳循环^[2]、调节气候^[3]、涵养水源^[4]等生态服务功能方面起着不可替代的作用。精准定量评估森林生态系统的碳汇能力状态和变化对于陆地生物圈和其他地表过程具有重要影响,同时对实现碳达峰、碳中和目标至关重要^[5-6]。传统的森林资源调查方法主要依赖于外业实地观测,例如使用测树仪、全站仪测量树高,但这种方式只能获取单个点位上的测量结果^[7-8]。虽然地面收集的样地数据具有较高的精度,但难以获取大范围的调查数据,耗时、费用高且效率较低,无法满足对森林资源调查和生态过程监测的大范围、高覆盖、多时相和时空连续观测的需求^[8]。卫星遥感观测作为一种具有广阔覆盖范围和定期观测能力的观测手段,是当前大范围森林调查的重要手段^[9-12]。它可以弥补传统方法的不足,有效减少外业调查及测量所需的人力和时间成本,并在保证精度的同时确保数据的空间完整性和时间一致性^[11]。

星载光学遥感和合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 在进行森林结构参数估测过程中,存在信号饱和问题^[13],且缺少垂直方向的森林信息描述,而星载激光雷达 (Light detection and ranging, LiDAR) 不仅克服了数据饱和问题,还凭借其高效且精确的测距^[14]和植被穿透能力^[15],在森林冠层垂直结构估测方面展示出独特的优势,可为估测森林结构参数提供准确、科学的数据^[16-18]。

整理关于星载激光雷达的综述可知,庞勇等^[19]以第一代星载激光雷达——地球科学激光测高系统 (Geoscience laser altimeter system, GLAS) 作为分析

对象,阐述了不同 GLAS 数据预处理和波形长度计算方法,分析了不同波形参数估测林业参数的应用潜力。胡国军等^[20]梳理了国外和国内不同代际的星载激光雷达基本情况,分析了不同类型的星载激光雷达在测绘领域的应用前景。胥喆等^[21]阐述了基于 GLAS 数据估测不同类型森林结构参数的应用研究。庞勇等^[22]总结了国内外森林探测激光雷达卫星载荷的发展、参数设置及应用潜力,梳理了现有星载载荷的优劣。庞勇等^[23]综述了森林碳储量遥感卫星载荷技术发展现状及趋势,分析了森林碳储量遥感卫星常用观测模式。以上研究更多从卫星硬件角度作为分析重点,综述了上一代单一或多类型的星载激光雷达估测森林结构参数的科学研究成果。但是针对目前在轨运行的星载激光雷达,缺少整体衡量估测森林结构参数精度的量化分析,且存在分析内容不系统的问题。

基于此,本文梳理目前在轨运行的几种星载激光雷达配置,探讨星载激光雷达在林业结构参数估测中的探测机制、技术体制、应用现状以及适用范围。同时,对目前在轨运行的星载激光雷达在估测森林结构参数应用的技术特点、应用优势、缺点以及发展趋势进行系统性分析、总结,重点阐述不同学者利用现有在轨的星载激光雷达,估测不同森林类型的研究成果。最后,展望星载激光雷达在林业遥感应用方面的发展趋势。

1 观测体系

近年来,星载激光雷达在估测森林结构参数中展示出了巨大的潜力。下面对星载激光雷达在估测森林结构参数应用中的发展历程及其基本参数加以概述,表 1 为目前在轨激光雷达基本参数。

表 1 星载激光雷达基本参数
Tab. 1 Basic parameters of spaceborne LiDAR

卫星名称	发射时间	探测方式	波束数	沿轨向足印 间隔/m	足印直径/ m	平地高程测量 精度/m	主要用途
ICESat-2	2018 年	光子计数	6	0.7	17.5	0.3	极地冰盖监测等
GEDI	2018 年	线性全波形	14	60	25	0.3	森林生物量测量
高分七号 (GF-7)	2019 年	线性全波形	2	2 400	20	0.3	高程控制点测量
句芒号	2022 年	线性全波形	5	180	20~25	0.4~0.7	陆地生态系统碳监测

1.1 ICESat-2

ICESat-2 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-2) 是美国国家航空航天局 (NASA) 于 2018 年 9 月 15 日发射的一颗卫星,旨在为监测全球地表结构提供科学数据^[24-25]。ICESat-2 搭载了先进的激光高度计仪器 (Advanced topographic laser

altimeter system, ATLAS)。ATLAS 的激光发射重频为 10 kHz,相对于 GLAS,其可以提供更密集的地表高程数据^[26-27]。ICESat-2 卫星测高原理是基于激光高度计的测量原理,该卫星通过分析激光脉冲返回的传播时间来计算激光测高仪与地面光斑之间的距离。为了确保测量精度和准确性,ICESat-2 利用

星载 GNSS(Global navigation satellite system)系统和地基卫星激光测距进行精密定轨,确定传感器的空间位置。同时,利用恒星相机和激光发射参考系统获取卫星的姿态信息和激光束的指向角^[27-28]。通过联合这些观测值,可以解算地面激光光斑的三维坐标,从而提供全球范围内高分辨率的地表高程数据。这些数据对于监测林区数字地面模型^[29]、森林树高^[30-32]、森林生物量变化^[33-35]、内陆湖变化^[36]、极地冰川变化^[37-39]等环境变化具有重要意义,并为气候模型和地表过程研究提供了宝贵的信息。

与 GLAS 中的单光束不同,ATLAS 采用衍射光学元件,对发射的 3 对波长为 532 nm 的激光束进行分离处理,使得每对光束由发射能量比为 4:1 的强光束和弱光束组成,且间距仅 90 m。这种发射方式可为具有不同表面反射率的地物提供观测信息,并有效测量地形坡度^[26-28]。图 1 展示了 ATLAS 数据在森林研究区光子数据分布情况。由于 ATLAS 数据为条带形式,将 ATLAS 数据按延轨距离和高程信息展开成剖面形式,图 1a 为 ATLAS 数据的分布形式,图 1b 为带有辅助标签数据的 ATLAS 数据。研究选取数据为森林研究区的星载光子数据,其中黑线为数字地表模型(Digital surface model, DSM),虚线为数字地面模型(Digital terrain model, DTM),观察图 1 可知,光子分布相对更集中于地表附近,其中

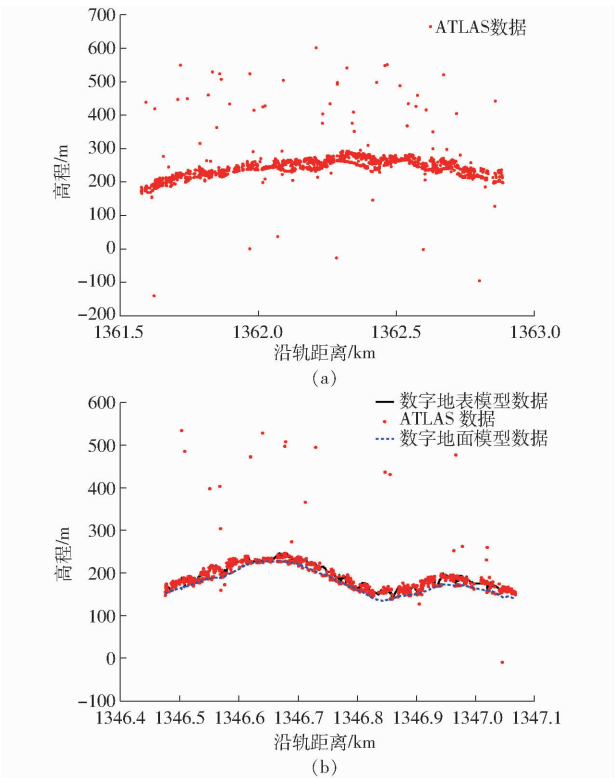


图 1 森林区域 ATLAS 光子数据分布示意图
Fig.1 Schematics of ATLAS photon data distribution in forest areas

地面光子相对冠层光子更密集,噪声光子分布最稀疏,但是其随机分布于地表以上,为有效数据使用提出挑战。因此,如何有效识别信号光子信息是星载光子计数数据应用的难点之一。表 2 列出了 ICESat-2/ATLAS 系统的关键参数。

表 2 ATLAS 系统硬件参数
Tab.2 Basic parameters of ATLAS

参数	数值
轨道高度/km	500
轨道倾角/(°)	92
重轨时间/d	91
设计寿命/a	3
光束数量	6
每对光束间距/km	3.3
强弱光束间距/m	90
望远镜孔径/m	0.8
接收器视场直径/m	42.5
单光子光时间精度/ps	800
波长/nm	532
发射脉冲宽度/ns	1.5
脉冲重复率/kHz	10
光斑直径/m	17.5
沿轨光斑间距/m	0.7

在估测森林结构参数应用方面,ICESat-2 的主要科学目标是量化全球范围森林生态系统的冠层高度、生物量和碳储量等森林结构参数,并实现森林生态系统的变化监测^[27-28,31]。通过对以上信息的精准获取,可增强对森林生态系统变化的预测能力并制定相应的应对措施^[31-33],ICESat-2 数据计划为自然灾害监测、海洋科学和生态研究等领域提供有效的科学数据,为后续研究提供重要支持,以推动环境保护和可持续发展。

1.2 GEDI

GEDI(Global ecosystem dynamics investigation)卫星于 2018 年 12 月成功发射,旨在通过激光测高仪进行全球生态系统的动力学调查^[40]。GEDI 搭载了全球首台多波束线性体制全波形激光测高仪,主要用于森林垂直结构测量,具有测距精度高、全天候连续观测、覆盖南纬 51.6°到北纬 51.6°范围、抗环境干扰能力强以及植被穿透性强的优点。其搭载于国际空间站,轨道高度约为 400 km。GEDI 包含 3 个相同的 Nd:YAG 激光器,以 242 Hz 脉冲重复频率 10 mJ 的能量,向地面发射波长 1 064 nm 的短脉冲激光。发射激光的光束发散角为 56 mrad。其中 2 个激光器为全功率激光器,1 个为覆盖激光器。覆盖激光器被分成 2 个光束,每个全功率激光器各产生 1 个光束,共产生 4 个光束。通过光束偏

转单元改变激光束指向,实现激光光斑在地面上快速移动,最终产生 8 个地面轨迹。GEDI 地面激光轨迹总幅宽为 4.2 km,沿轨间距为 60 m,垂轨间距为 600 m,光斑平均直径约为 25 m,并且,GEDI 的观测覆盖范围为南纬 51.6°到北纬 51.6°^[40-41]。表 3 列出了 GEDI 系统的关键参数。

表 3 GEDI 系统参数
Tab.3 GEDI parameters

参数	数值
轨道高度/km	400
覆盖范围	51.6°S ~ 51.6°N
重复频率/Hz	242
脉冲宽度/ns	15
波长/nm	1 064
足印直径/m	25
地理定位精度/m	8
沿轨足印间隔/m	60
垂轨足印间隔/m	600

GEDI 的主要科学任务是利用高分辨率的波形激光测距系统观测和调查地球上森林资源和地形等情况,图 2 为 GEDI 波形激光雷达获取森林结构参数示意图。它可实现中低纬度范围内森林垂直结构参数的时空高分辨率测量,通过探索 GEDI 波形特征和其他地物特征对目标地物结构参数的影响,为目标参数的定量化反演提供理论支持。GEDI 的科学任务还包括量化中低纬度范围内地上生物量,评估植被碳汇潜力,定量分析生物栖息地质量以保护生物多样性,并为决策提供依据^[41]。

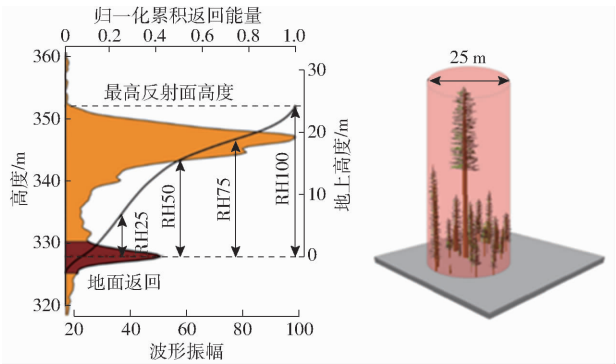


图 2 森林区域波形数据分布示意图

Fig.2 Waveform data distribution in forest regions

至今,NASA 已公开了两种格式的数据产品,包括脚印点 HDF 数据和格网数据集,并提供不同处理程度的产品。根据数据处理阶段,GEDI 数据产品被划分为 4 个级别。1 级产品(定位波形):经过地理位置定位的 GEDI 波形数据^[42];2 级产品(足印级冠层高度和剖面度量):基于波形数据提取的冠层高度和剖面指标,例如地面高程、冠层高度、相对冠层

高度指标和叶面积指数(Leaf area index, LAI)等^[43];3 级产品(格网冠层高度及其变化):包括冠层高度、覆盖度和 LAI 等;4 级产品(足印以及格网地上碳估计):基于光斑尺度和格网化的地上碳估算,通过将 2 级数据产品中得出的光斑尺度指标,转换为光斑尺度地上生物量,其次,利用统计理论估算出 1 km 格网的平均生物量^[44]。

GEDI 的星载激光雷达数据在森林垂直结构信息提取方面具有巨大的应用潜力^[45]。其相对于 GLAS,具备更小的光斑直径和更高的采样密度,使其成为目前大区域森林地形监测和制图的重要工具,具有广阔的应用前景。除了在森林地形监测方面的应用,GEDI 数据在森林生态系统的其他研究也提供了更进一步的认识和了解^[46-48]。通过利用 GEDI 提供的植被冠层垂直结构测量数据,可以获取实时有效的信息,用于物种的保护和管理^[49]。通过分析 GEDI 提供的冠层高度^[50]、森林类型^[51]、叶面积指数^[52-53]、生物量^[54-56]和其他植被特征,可以推算生态系统的碳通量^[57-58],实现碳监测^[21]。此外,GEDI 提供的高密度观测数据,可以改善植被分布总体精确度和空间细节,成为森林规划和研究的重要工具。GEDI 数据还可以对大范围内森林结构参数进行预测,从而减少火灾的发生^[59]。

1.3 GF-7

高分七号是我国首颗民用亚米级立体测绘卫星,它具备高空间分辨率、高时间分辨率和高精度观测的能力^[60-61]。除了亚米级分辨率的两线阵光学立体相机^[62],高分七号还搭载了我国首台用于对地观测的星载激光测高仪,基本参数见表 4^[60],主要用于获取高程控制点,提高立体影像测图精度。

表 4 高分七号卫星激光测高仪基本参数
Tab.4 Parameters of laser altimeter for GF-7 satellite

参数	数值/类型
波长/nm	1 064
激光器数量	4(2 主+2 备)
发射频率/Hz	3
地面光斑大小/m	19(波束 1);21(波束 2)
波形采样频率/GHz	2
波形量化位数/bits	10
波形采样模式	高低增益分别采样
发射波形脉宽/nm	5 ~ 7

高分七号卫星搭载的前后视立体相机、星载激光测高仪与足印相机,为该卫星带来了独特的观测能力^[63-67]。前后视立体相机可以通过不同角度的观测,获取同轨的光学立体影像,从而实现对地物的三维立体测绘^[68-69]。高分七号搭载的星载激光测

高仪能为全球范围的地面高程测量提供可靠的数据支持^[70-71]。鉴于其波形数据特性^[72],在森林植被区域,激光测高仪能够提供高精度的地面高程数据^[73],对于森林生态系统的结构参数估测^[74]、地形测绘^[75]等方面具有重要的应用价值,但受限于激光重复频率,其地面激光足印较为稀疏。

1.4 句芒号

句芒号是中国的第一颗专门用于高精度监测陆地生态系统碳储量、森林资源和森林生产力的林业遥感卫星,也是我国首颗实施森林碳汇主动联合观测的遥感卫星^[76-78]。卫星运行在高度为 506 km、倾角为 97.4° 的太阳同步轨道上^[79-80]。它利用高精度遥感技术,能够对全球范围的森林植被生物量^[81-82]、气溶胶分布和叶绿素荧光进行定量遥感测量^[83]。句芒号卫星可以获取高精度的森林植被数据,进而监测和评估陆地生态系统的碳储量、森林资源和森林生产力等重要参数。这对于全球森林保护和碳循环研究具有重要意义^[84]。

句芒号卫星配置了多种载荷,包括多波束激光雷达、多角度多光谱相机、超光谱探测仪和多角度偏振成像仪,用于获取植被高度、植被面积^[84]、叶绿素荧光^[83]和森林病虫害^[85]等与森林结构参数相关的核心数据。多波束激光雷达通过计算激光到达树冠和地面的时间差获取高精度的植被高度信息。卫星搭载了 5 台激光器,每台每秒发射 40 次激光,实现了足印光斑间隔由公里级跨越至百米级,大大提升了植被测高精度。卫星还安装了 5 个多光谱相机,实现了对地多角度立体观测(0°、±19°、±41°),多光谱相机可实现从可见光至红外波段的全覆盖观测,为实现全球范围的地表数据观测提供科学数据^[86]。

此外,卫星还增加了大气激光雷达,用于获取大气纵向的消光廓线、光学厚度和云特性信息。通过横向和纵向的监测数据,可以将结果从二维转换为三维立体信息,提高了数据精准度。表 5 为句芒号激光雷达基本参数^[78-79]。

表 5 句芒号激光雷达基本参数
Tab.5 Parameters of Goumang LiDAR

参数	植被子系统	气溶胶子系统
激光波束数	5	1
激光波长/nm	1 064	1 064/532
脉冲能量/mJ	70	110
激光地面足印/m	20 ~ 25	100
测距精度(静态)/m	≤0.3	
气溶胶偏振探测波长/nm		532
气溶胶探测采样间隔/m		≤30

2 森林结构参数估测研究现状

2.1 林下地形估测

林下地形信息是估测一切森林结构参数的基础内容,影响地形反演精度的主要因素包括植被覆盖度和坡度。为精准估测林下地形,国内外学者开展了大量研究。VITEZSLAV 等^[30]分析了 ATL08 区段级别地面高程数据在欧洲境内的精度,结果为:均方根误差(Root mean squared error, RMSE)为 1.73 ~ 3.22 m。黄佳鹏^[87]探究了美国 9 个研究区的 ATL08 产品提取光斑尺度地面光子的精度,相关系数 R^2 为 0.8, RMSE 为 3.02 m。

董瀚元等^[88]利用 G-LiHT 和帽儿山高精度机载雷达数据对 GEDI V2 数据在针叶林和针阔叶混交林中的地形反演性能进行了验证。研究选择美国西波拉的针叶林地区和帽儿山的针阔叶混交林地区进行研究。验证结果显示,在针叶林地区的地形反演精度 RMSE 为 2.33 m,平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)为 1.48 m。WANG 等^[89]将 GEDI V2 数据与 33 个国家生态观测网络(NEON)站点的激光雷达数据进行了比较。研究中利用离散点云激光雷达上的模拟机载激光扫描波形对 GEDI 的地面高程和相对高度(Relative height, RH)进行了比较。结果显示,GEDI V2 在地面高程和 RH100 估计值上具有较高的精度,均方根误差分别为 1.38 m 和 2.62 m。LIU 等^[90]探究 ICESat-2 的 ATL08 区段级别地面高程数据在美国 NEON 研究区的精度,其 R^2 为 1, RMSE 为 2.24 m。GEDI 估测精度为 R^2 为 1, RMSE 为 4.03 m,研究结果显示 ICESat-2 估测林下地形的精度优于 GEDI。

SUN 等^[91]通过对高分七号的波段进行处理,使用 LiDAR 数据验证地面高程的精度,分析坡度、信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)以及植被高度等因素对地面高程估计的影响。结果表明:RMSE 和均值误差分别为 2.30 m 和 0.28 m,激光 1 比激光 2 在估测地形高程方面的性能更好,不同土地覆被类型地表高程精度差异显著。地面高程精度随坡度、植被高度和植被覆盖度的增加而降低,但随着信噪比的增加而增加。王太平^[92]利用高分七号(搭载具有一定交会角的前后视立体相机)多角度的观测数据,获取该地物的同轨光学立体影像。借助其搭载的星载激光测高仪,高分七号可以实现 0.30 m 的测距精度。

以上研究多为探究 ICESat-2 与 GEDI 数据估测林下地形,初步对比结果表明单光子形式的 ICESat-2 估测精度指标表现更优。总体而言,星载

激光雷达数据估测森林林下地形精度较高,各研究区估测林下地形的研究结果 RMSE 可达到 1.38 m,能为森林生态系统的监测和管理提供有力的数据支持,但目前主要是稀疏点状测量,还无法做到大范围、高密度的测量。

2.2 树高估测

树高是反映森林生态系统垂直结构参数重要的基础性指标。现有针对星载激光雷达估测森林树高的研究主要分为两种类型:仅依赖于星载激光雷达数据的光斑尺度估测和协同多源遥感数据区域尺度估测^[34]。

2.2.1 光斑尺度树高估测

为实现光斑尺度树高估测研究,韩明辉等^[93]基于 GEDI L2A 数据建立冠层高度反演模型,不同算法组数据反演结果显示,精度最低的是 a5 算法组, R^2 为 0.44, RMSE 为 6.39 m, MAE 为 0.33 m,精度最高的是 a2 组, R^2 为 0.87, RMSE 为 1.71 m, MAE 为 0.84 m,精度差异较大,因而在进行冠层高度反演时选择 a2 组更合适。袁莺慧等^[94]通过校正 GEDI 数据的地理定位误差提高地面高程和冠层高度的精度。研究表明,当植被覆盖度大于 25% 时,数据的精度更高;而在坡度为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 的缓坡地区,冠层高度估测精度最高。

黄佳鹏^[87]以 G-LiHT 数据的覆盖位置作为研究区,以 ATL08 数据作为研究数据,开展森林树高精度分析,实验结果为 R^2 为 0.49, RMSE 为 4.39 m。朱笑笑^[95]通过 ATL08 数据提取森林高度,并与对应的机载验证数据比较,实验结果为 R^2 为 0.58, RMSE 为 6.62 m。PANG 等^[96]利用航空衍生的数字地形模型数据过滤策略,准确地从 ICESat-2/ATLAS 数据中提取冠层高度,结果表明,结合高精度 DTM 和 ATLAS 产品可以显著提高山区森林冠层高度的反演精度。利用所提出的滤波方法,得到了整体的 RMSE 为 4.35 m。整理以上研究可知,光斑尺度情况下, GEDI 相对 ATLAS 表现出更高的冠层高度估测精度,其 RMSE 最优可达 1.70 m,但是受限于研究区坡度等因素影响,后续研究中应着重考虑实际环境对估测精度的影响。

结合《国家森林资源连续清查技术规定》^[16]可知,对于树高估测精度要求为:当树高小于 10 m 时,测量误差小于 3%;当树高大于或等于 10 m 时,测量误差小于 5%。对比森林资源技术规定,星载激光雷达估测光斑尺度树高尚不能满足森林资源连续清查技术,仍需进一步加强此类研究,进一步提升树高估测精度。但是,结合星载激光雷达光斑尺寸可知, ATLAS 与 GEDI 数据均为大光斑数据,其光斑直

径分别为 17 m 和 25 m,结合光斑直径与光斑覆盖面积可知,现有星载激光雷达技术刻画信息均针对林分尺度而不是单木尺度,而此类利用星载激光雷达估测森林树高相关标准仍处于待完善阶段。

2.2.2 区域尺度冠层高度

由于星载激光雷达数据限制,为实现区域尺度树高反演研究需协同多源遥感数据,其中,为探究 GEDI 协同多源数据估测冠层高度精度,陈贵珍等^[97]利用 Sentinel-2 影像、航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle radar topography mission, SRTM)数据和 GEDI 提供的森林高度产品构建了森林高度预测模型。研究表明,通过激光点云数据验证模型精度为: R^2 为 0.73, RMSE 为 2.62 m, MAE 为 2.23 m。刘丽娟^[98]利用第 2 版 GEDI 数据提取森林冠层高度,并联合光学遥感影像的特征参数完成了云南省 30 m 分辨率的森林高度制图。与星载 GEDI L2A 数据相比,该森林高度图 R^2 为 0.59, RMSE 为 5.93 m;与机载数据相比,该森林高度图的 R^2 为 0.31, RMSE 为 3.84 m。ZHOU 等^[99]以福建为研究区域,提出了一种与 GEDI 卫星的激光雷达数据相结合的估算森林冠层高度的方法。利用大量森林调查数据树高分布信息,建立一个具有 30 m 空间分辨率的改良森林冠层高度模型(MGEDI_V27)。结果表明,估算的林冠层高度平均为 15.04 m,标准差为 4.98 m。FOLHARINI 等^[100]利用 GEE 平台、随机森林回归模型和 GEDI 数据对葡萄牙北部和西班牙加利西亚 4 个受野火影响地区的树高进行了分析。火灾前,冠层高度范围为 5.21 ~ 20.16 m, R^2 为 0.82。火灾后,冠层高度范围为 5.55 ~ 9.12 m, R^2 为 0.47,实验数据证明,利用 GEDI 数据可实现森林生态系统的动态化监测。

为探究 ICESat-2 协同多源数据估测冠层高度精度, XI 等^[101]以黑龙江省桦南林区为研究对象,利用 ATLAS 数据提取针叶林、阔叶林和针阔混交林的分布特征。分别采用随机森林法和梯度提升决策树法,建立了针对不同森林类型的冠层高度估算模型,验证了所建模型的准确性,并根据估算模型得到了森林冠层高度。结果表明,考虑森林类型的森林冠层高度估计模型精度更优。LIN 等^[102]使用 ICESat-2 ATL08、ATL03 数据和 ZY-3 卫星立体图像协同估测南宁市的森林冠层高度。研究结果 RMSE 为 3.47 m, R^2 为 0.51。

为探究不同模态星载激光雷达协同多源数据估测冠层高度精度, MOHAMED 等^[103]利用 ICESat-2 和 GEDI 数据,采用地质统计学克里金方法分别绘制了印度热带和亚热带森林的林分高度,并利用地

面真值样本对生成的林分高度进行验证。结果表明,GEDI 数据在热带森林中的 RMSE 分别为 3.99 m 和 2.62 m,优于 ICESat-2 数据。SOTHE 等^[104]比较了星载 LiDAR、GEDI 和 ICESat-2 的性能,并结合 ALOS-2/PAL SAR-2 和哨兵 1、哨兵 2 数据制作了加拿大 2020 年的连续树冠高度图。得出 GEDI 比 ICESat-2 具有更好的性能,平均差异分别为 0.9 m 和 2.9 m,RMSE 分别为 4.2 m 和 5.2 m。然而,由于 GEDI 和机载点云数据在大多数北方森林中都没有覆盖范围,因此 ICESat-2 比 GEDI 能覆盖更大的森林区域,有助于获取更广泛的森林结构信息。

综上所述,星载激光雷达在估测森林树高方面表现出较好的优势,在光斑尺度与区域尺度的冠层高度估测研究中,星载激光雷达对于提高估测精度表现出巨大潜力。其中,由于 GEDI 估测树高的优势,在区域尺度冠层高度估测方面,其相对 ATLAS 展示了更高的估测精度,估测结果的 RMSE 最优可达 2.62 m,但是受限于研究区森林类型等情况,仍需进一步扩大 GEDI 数据应用范围。结合《国家森林资源连续清查技术规定》^[16]可知,该结果与国家森林资源连续清查需求仍然存在差距,需要进一步提高估测精度。以上研究结果虽不能为国家森林资源连续清查提供精准数据,但是其应用与推广将有助于提供更准确的森林树高监测数据,并为相关研究和决策提供支持。

2.3 叶面积指数与冠层覆盖度反演

叶面积指数是指单位水平地面上单面的叶面积^[105],它与植物光合作用、蒸腾作用和生态系统生产力密切相关,是模拟陆地生态过程、生物地球化学循环以及水热循环的重要参数^[106-107]。ZHANG 等^[108]为了评估 ICESat-2 数据估测叶面积指数的可行性和准确性,选择 MODIS 亚马逊雨林和大兴安岭森林两个站点与 500 m 空间分辨率的 LAI 产品进行比较。得出结果: R^2 为 0.69,RMSE 为 2.55 m,MODIS LAI 与 ICESat-2 的 LAI 之间 R^2 为 0.62。WANG 等^[109]评估了 GEDI 估测美国大陆 22 个研究区的叶面积指数精度,结果表明,GEDI 低估了 LAI。

冠层覆盖度是指植物冠层所覆盖的地表面积与该地表总面积之比。NARINE 等^[110]利用 ICESat-2 数据,建立了一个 30 m 树冠覆盖率模型,估测了 30 m 像素尺度的冠层覆盖度。在光斑尺度上,ICESat-2 估测的冠层覆盖与机载激光雷达之间的相关系数为 0.57~0.78。

分析以上研究可知,利用星载激光雷达估测叶面积指数与冠层覆盖度参数精度的相关系数大于 0.55,综合现有的森林资源清查标准^[16]可知,单木

的胸径和树高为森林资源的主要调查对象。叶面积指数与冠层覆盖度更倾向于刻画森林生态系统的水平结构参数,不同于地形和树高等森林结构参数,星载激光雷达在刻画叶面积指数与冠层覆盖度等信息时需要通过提取对应的特征参数与对应的森林结构参数建立反演模型。然而基于此类研究的验证倾向于使用单木相机开展数据采集,存在效率不高问题,而且现有针对叶面积指数与冠层覆盖度的描述尚未被列入森林资源清查的主要内容,后续研究可进一步拓展在叶面积指数等不同结构类型的森林结构参数反演研究及具体应用。基于现有的森林资源清查标准可知,尚未有针对定量遥感估测叶面积指数与冠层覆盖度反演的精度标准,建议林业部门出台类似标准,为定量遥感估测森林叶面积指数与冠层覆盖度反演提供技术指南与规范。

2.4 蓄积量与生物量密度反演

森林蓄积量是单位面积上所有活立木树干的体积和,是地方、区域和国家尺度上森林资源管理和评估的关键森林结构参数^[111-112]。在利用星载激光雷达数据估测蓄积量的研究方面,刘美艳等^[113]以云南香格里拉森林为研究区,提取 ICESat-2/ATLAS 和 Sentinel-2A 影像的特征变量,采用逐步线性回归和随机森林方法分别建立线性和非线性回归模型,反演森林蓄积量,结果表明,利用随机森林方法,联合 Sentinel-2A 和 ICESat-2/ATLAS 数据集的反演精度相对线性回归模型表现出更优的精度评价指标, R^2 、RMSE 和 rRMSE 分别为 0.70、484.78 m^3/hm^2 和 36.46%。

由于森林蓄积量验证数据采集难度较大,且涉及更多的林学基础知识,因此,在该领域研究较少,但是森林蓄积量是定量反映森林生态系统的的一个重要的指标,故今后需在估测森林蓄积量等专有的林学参数方面开展进一步研究,探究出更合适的星载激光雷达参数,用以估测森林蓄积量等森林结构参数。

生物量密度 (Above-ground biomass density, AGBD)是指单位面积内实存生活的有机物质干质量,在林业定量遥感领域通常以地上生物量密度作为主要研究对象^[114-115]。XU 等^[116]以云南省西北部香格里拉地区作为研究区域,利用 GEDI 数据进行了栎属生物量的估计模型建立。经过变量选择,研究结果显示,随机森林模型估计精度(R^2 为 0.91, RMSE 为 19.76 t/hm^2) 优于多元线性回归和支持向量回归方法。CHEN 等^[117]通过协同 GEDI、ALOS 与 Sentinel,使用从地形分层对象计算的变量开展相关性分析,选择了不同类型森林作为 AGBD 建模的

预测因子,使用基于 GEDI 的 AGBD 和地理分层预测因子建立随机森林模型,以获取研究区的生物量值。实验结果显示,地理分层方法准确地估计了异质森林的生物量,并比未分层过程提高 34.79% 的准确性。ZHAO 等^[118]以 GEDI 数据为主要信息源,以徐州城区为研究区域。利用 GEDI、Sentinel-2 和 Landsat-8 卫星的图像特征估测徐州城区生物量情况,试验结果表明利用 GEDI 数据协同光学影像的方法估测城区森林生物量是有效的,其估计精度 R^2 为 0.58,高于仅使用光学影像的方法(R^2 为 0.45)。

NARINE 等^[119]将自定义噪声滤波和光子分类算法应用到 ICESat-2 地理定位光子数据(ATL03)中,获得了强光束和弱光束组成的单光束对,并估测了冠层高度。采用回归分析方法,从沿径迹方向的 100 m 段提取冠层高度参数,估算冠层高度参数。然后根据 ICESat-2 得出冠层高度参数,联合多源遥感数据用以估计 AGBD,最终回归模型的 R^2 和 RMSE 分别为 0.62 和 24.63 t/hm²。SONG 等^[120]利用 ATLAS 数据估算了高海拔生态脆弱区的森林地上生物量密度(AGBD),以香格里拉典型山区为研究区,结合 54 个地面样本的生物量数据,使用超参数优化随机森林模型,用以估计 AGBD。将地统计学中的最佳方差函数模型与斜率作为协变量相结合,估计 AGBD,优化后模型 R^2 为 0.93, RMSE 为 10.13 t/hm²。DENG 等^[121]提出了一种利用星载激光雷达(LiDAR)数据和光学遥感图像进行高寒峡谷区域生物量快速估算的方法。利用 ICESat-2 的星载激光雷达数据、Landsat8 OLI、Sentinel-2 和 Sentinel-1,探索了数据在高山和峡谷地区的生物量估测能力,与森林调查数据的实际测量值相比,估计精度为 92.28%。

以上研究基于 GEDI 或 ICESat-2 数据,协同多源遥感参数,估测了不同的研究区生物量。结果显示,星载激光雷达数据在生物量反演方面具有较高的精度和可靠性,其相关系数优于 0.6,但因其数据

特点,仅可实现光斑尺度的森林结构参数估测研究,需协同区域尺度的多源(光学或 SAR 数据)遥感数据,用以开展区域尺度森林结构参数估测研究。而且,不同研究区生物量验证数据也存在差异,如基于单木检尺结合样地模型,基于机载点云数据结合样地模型等方法。但是由于样地模型存在明显区域差异性,使得整理验证精度存在一定的不确定性。综合现有的森林资源清查标准可知,尚未有针对定量遥感估测森林生物量的精度标准,建议林业部门出台类似标准,为定量遥感估测森林生物量提供技术指南与规范。

3 研究发展趋势分析

3.1 星载激光雷达估测森林结构参数研究优点与不足

以“星载激光雷达”与“林业”作为关键词,在中国知网和 Web of Science 搜索对应文献,并导出文献计量可视化分析,如图 3、4。通过观察图 3、4 可知,星载激光雷达应用于森林研究于 2020 年开始出现递增情况,分析原因可知,随着 ICESat-2 与 GEDI 逐步开始免费对外分发数据,对星载激光雷达在林业的研究逐步增多。研究热点主要集中在:森林冠层高度、平均树高与生物量等常见的森林结构参数。

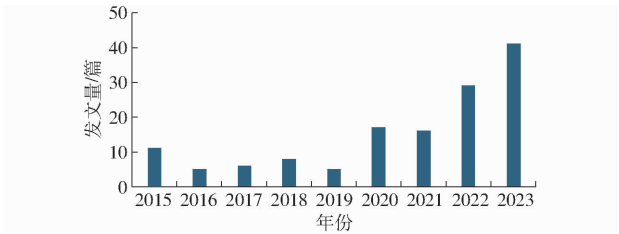


图 3 “星载激光雷达”与“林业”文献发表年度趋势
Fig.3 Annual trend of reference publication about “Spaceborne LiDAR” and “Forestry”

由于激光重频等硬件条件限制,目前国产星载激光雷达更多应用在高程控制点方面,在估测森林结构参数研究方面应用较少。而我国句芒号已完成

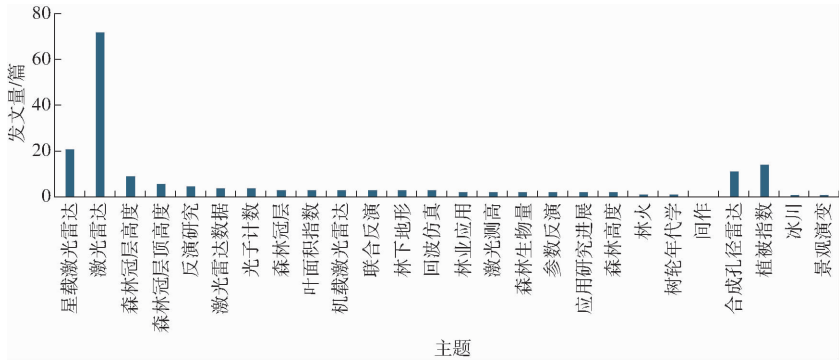


图 4 “星载激光雷达”与“林业”参考文献主题分布
Fig.4 Distribution of reference topics about “Spaceborne LiDAR” and “Forestry”

在轨测试,还没有规模化应用,随着数据逐步分发,其搭载了5波束全波形激光雷达与5角度多光谱相机等载荷,可以以激光雷达、多角度、多光谱的主被动融合方式探测不同类型森林结构参数。预期随着我国国产星载激光雷达数据逐步对外分发,未来几年又将迎来一批我国国产数据在估测森林结构参数的应用研究成果。

星载激光雷达近几年得到快速发展,在林业领域的应用也越来越广泛。实践证明星载激光雷达在林业定量遥感研究中具有如下优点:①从机理角度考虑,光学遥感、微波雷达数据在高程测量精度方面存在误差,而星载激光雷达主要优势为测距精度高,其相对另外两种遥感方式能更精确获取森林区域的三维地理坐标。②几何参数测量能力高,不同于光学遥感,微波雷达可能存在森林遮蔽或森林生物量饱和问题,星载激光雷达在一定程度上可以穿透森林覆盖,直接获取森林垂直结构信息,在估测树高、林下地形等森林垂直结构参数方面表现出较强的能力。③与光学遥感数据存在多光谱、高光谱、超高光谱类似,目前可用的星载激光雷达载荷具有光子和波形两种模态,通过协同不同类型星载激光雷达,可实现全球植被全覆盖,能够捕捉全球森林的广泛趋势和动态变化情况。④在人工森林样地调查工作中,人工成本较高,而遥感观测手段具有工作效率高、耗时低、费用低,地面人工作业工作量少等优点,相对于人工实地和无人机数据采集,成本更低。

虽然星载激光雷达数据在林业应用方面具有明显的优势,但其反演精度还有待提高,相比于其他遥感手段,还存在如下问题或不足:①由于卫星处于太空空间,观测器受空间环境变化、卫星姿态、硬件安装误差等影响,与光学遥感、微波雷达类似,星载大光斑数据同样存在平面精度偏低的劣势。②星载激光雷达数据为空间离散的稀疏光斑形式,数据形式主要为刻画森林垂直结构参数,其在辐射参数反演方面表现不佳,而光学遥感、微波雷达研究相对更成熟,在辐射参数定量反演更具优势,后续研究中可结合多源数据,开展不同的森林结构参数定量反演研究。③星载激光雷达虽然具有较高精度的测距能力,但是其表现为大光斑形式,存在数据不连续情况,难以利用单一形式的数据开展区域尺度数据研究,而光学遥感、微波雷达表现为面状的数据,可为区域尺度的森林结构参数估测研究提供研究数据。④虽然星载激光雷达能够部分穿透云层覆盖,但是若存在雨雪等复杂天气,将从机理层面造成星载激光雷达数据的噪声等问题,故其受云雨天气影响,难以全天候工作。

3.2 全波形和光子星载激光雷达

相对于星载全波形激光雷达数据,星载光子云激光雷达具有更高的激光发射频率,进而可以获得的足印密度更高,激光足印间距小,足印光斑尺寸也小,能够获取更多观测信息,对于森林结构参数提取具有重要意义。但光子激光雷达发射和接收的是弱信号光子,受背景噪声影响极大,容易出现大量噪声,造成后续估测精度出现严重偏差。而且,由于光子信号仅记录光子返回的位置信息,不具备光子的属性信息,因此如何有效识别地面信号光子与森林冠层信号光子,有待于深入研究。星载激光雷达的这两种探测方式未来还会长期并行发展。光子体制数据可以弥补波形数据覆盖率低的缺点,而波形数据信噪比高于光子数据,数据处理算法成熟,现有研究反演精度较高。

现有部分研究尝试探究不同模态星载激光雷达估测森林结构参数的能力,其中,文献[90]研究结果表明,光子计数激光雷达在估测林下地形的参数方面具有一定优势,而波形数据在估测森林冠层高度方面具有一定优势,在后续研究中,联合不同模态星载激光雷达开展数据估测研究,将进一步提升星载激光雷达在林业遥感的应用范围和精度。但是,由于星载激光雷达存在光斑不连续的特性,将导致研究的推进存在困难。

3.3 多源数据与星载激光雷达协同

现有的多模态星载激光雷达,可以实现高密度的全球垂直数据采集,为区域尺度的全球森林结构参数估测提供光斑尺度样本与可靠验证基础。以多光谱、高光谱与多角度的光学遥感数据作为研究森林生态系统的基础,可以构建出多光谱、多纹理^[122]和多角度光学遥感^[123]等多种类型植被特征指数。常用的植被特征指数通常是多个波段的光谱反射率比值线性或非线性组合,能够将多类型的光谱信息整合到一种植被指数中,用以诊断森林生态系统的生长状态,以及反演各种森林植被的水平结构参数^[124]。采用多角度观测的光学遥感手段获取植被的二向反射分布函数(Bidirectional reflectance distribution function, BRDF)信息,多角度光学遥感具有求解植被结构特征参数的潜力^[122,125-126]。对不同类型的植被指数进行建模计算,可以估测森林郁闭度、叶面积指数等森林结构参数。基于线性或非线性的建模方法,可以将光学遥感影像提供的各谱段反射率与森林生态系统的结构参数建立关系^[101,115],为全球碳储量等森林结构参数制图提供了可靠的光学影像信息,为实现高精度的森林结构参数估测,应协同星载激光雷达与光学遥感数据,优

势互补,进一步提升林业遥感的反演精度。

微波合成孔径雷达可采用不同极化的雷达^[127]、后向散射强度^[128]、极化分解参数等特征^[129-130]进行森林垂直结构参数估测。但是,不同波段的 SAR 数据对于森林穿透表现出不同的能力,现有的 C 波段^[131-132]、L 波段^[133-135]、X 波段^[136-137]和 P 波段^[138],受森林生物量饱和度影响,存在估测误差问题,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)计划发射的 BIOMASS 卫星搭载的主要载荷为全极化 P 波段 SAR,P 波段是目前可搭载于卫星的最长波段,对森林生物量具有较好的敏感性^[139]。随着 SAR 成像技术的发展和应用需求的推动,SAR 载荷已逐步发展到多波段、多极化^[140-141]、多角度、多时相^[142]、多站以及不同观测维度组合^[143-144]的多维度 SAR 数据,不同观测维度的 SAR 数据在估测不同森林结构参数方面表现出不同的能力,不同观测维度的融合,综合利用了多维度 SAR 数据的观测优势,进一步提高了 SAR 载荷的应用潜力,又进一步推动了星载激光雷达数据协同 SAR 载荷的森林结构参数应用研究。

因此,在实际的林业遥感应用中,需要深入开展协同光学和 SAR 等多源数据,实现区域尺度的森林生态系统应用研究^[101,123]。但是,在协同多源数据研究过程中,要进一步探究多源数据的分辨率、像元与光斑形状匹配方式、多源数据的定位精度、多源数据的系统模型等多方面问题,增强多源数据的空间匹配程度,为多源数据协同提供良好基础。

4 展望

通过分析不同类型激光雷达的发展可知,星载激光雷达的光斑大小、工作波束和激光发射重复频率都在不断提升。可以为观测地表数据提供更加密集的地面采样和更小的足印范围,为后续其在林业方面的应用提供更为科学有效的数据。但是,由于林业方面应用本身的复杂性,现阶段还存在以下需要解决的问题:

(1) 森林结构参数问题

现有的面向林业应用的星载激光雷达数据更多

是针对森林冠层高度等垂直结构森林参数,并未系统开展量化的森林蓄积量和碳储量的研究,而蓄积量和碳储量等生态指标才是描述森林生态系统更直接有效的指标,因此,后续研究中,应增加利用星载激光雷达数据直接反演蓄积量和碳储量等森林生态系统评价指标,进而为我国“碳交易”平台提供直接有效的科学数据。

(2) 产品体系及标准规范问题

现有针对国产星载激光雷达数据的研究,更多侧重于科研数据的探索性研究,缺少专门刻画森林生态系统的对应激光雷达数据产品及标准规范。因此,在进一步加大探索性研究的同时,要加强科研成果向业务化产品应用转化,并急需建立针对林业应用的国产星载激光雷达数据应用产品体系和技术规范,从而更好地指导规模化、业务化林业应用和数据产品的生产,这样不仅有助于有效掌握国家及区域尺度森林植被生态系统结构、功能及其对周围环境变化的响应,还可以为我国在外交政治谈判中增加更多的话语权。

(3) 林业应用精度评价问题

现有评价体系缺少对星载激光雷达处理算法应用在林业上的评价方法,而且仅对星载光斑区域进行离散点测量存在精度衡量不系统、几何量不明晰等问题。后续研究应瞄准国家星载激光测高卫星发展需求,设计新的星载激光雷达数据处理评价方法,完善星载激光雷达处理和验证体系,形成对森林树高、叶面积指数、生物量、碳储量等森林结构参数的科学有效评价体系,更好地服务于森林资源精准监测,对于推动我国星载激光雷达数据的应用具有重大意义。

(4) 林业用激光雷达参数问题

林业定量研究中,最基础的林业研究单位为“林班”,其定义多为 30 m × 30 m 的分辨率,与现有研究的 GEDI、GF-7 和句芒号的设计光斑尺寸存在差异,后续星载激光雷达的光斑尺寸可以综合考虑工作频率和光斑大小等信息,为林业遥感反演工作提供更切实有效的数据。

参 考 文 献

[1] 国家林业和草原局. 2021 中国林草资源及生态状况[M]. 北京:中国林业出版社, 2022.

[2] MURAKAMI H, LEVIN E, DELWORTH T L, et al. Dominant effect of relative tropical Atlantic warming on major hurricane occurrence[J]. Science, 2018, 362(6416): 794.

[3] DUFFY P B, FIELD C B, DIFFENBAUGH N S, et al. Strengthened scientific support for the endangerment finding for atmospheric greenhouse gases[J]. Science, 2019, 363(597): 5982.

[4] CHUKWUDI N, VILÉM P, VIT V. Responses of soil and plants to spatio-temporal changes in landscape under different land use in Imo watershed, southern Nigeria[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(10): 1-17.

[5] 国家林业局. 应对气候变化林业行动计划[M]. 北京:中国林业出版社, 2010.

- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Terms and definitions [EB/OL]. <http://www.fao.org/3/I8661EN/i8661en.pdf>.
- [7] 范文义,张海玉,于颖,等.三种森林生物量估测模型的比较分析[J].植物生态学报,2011,35(4):402–410.
FAN Wenyi, ZHANG Haiyu, YU Ying, et al. Comparative analysis of three forest biomass estimation models [J]. Journal of Plant Ecology, 2011, 35(4): 402–410. (in Chinese)
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest land-use change from 1990 to 2010: an update to a global remote sensing survey of forests[EB/OL]. <http://www.fao.org/3/a-i5098e.pdf>.
- [9] MAGHSOUDI Y, SOHRABI H. Relating ALOS-2 PALSAR-2 parameters to biomass and structure of temperate broadleaf hyrcanian forests[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2019, 47(5):749–761.
- [10] NAZARIN E, KANNIAH K D. Optical and radar remote sensing data for forest cover mapping in Peninsular Malaysia[J]. Singapore Journal of Tropical Geography,2018, 40(2): 272–290.
- [11] ZHANG Y, LING F, FOODY G M, et al. Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007–2016[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 74–91.
- [12] WANG Z, CRYSTAL B, SCHAAF P, et al. Retrieval of canopy height using moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 1595–1601.
- [13] IMHOFF M. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2):511–518.
- [14] XIAO J, CHEVALLIER F, GOMEZ C, et al. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111383.
- [15] DONG L, TANG S, MIN M, et al. Above ground forest biomass based on OLSR and an ANN model integrating LiDAR and optical data in a mountainous region of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(15):1–25.
- [16] GB/T 38590–2020 国家森林资源连续清查技术规定[S].2020.
- [17] HYDE P, NELSON R, DAN K, et al. Exploring LiDAR–RaDAR synergy predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(1): 28–38.
- [18] SUN G, RANSON K J, KIMES D S, et al. Forest vertical structure from GLAS: an evaluation using LVIS and SRTM data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(1): 107–117.
- [19] 庞勇,于信芳,李增元,等.星载激光雷达波形长度提取与林业应用潜力分析[J].林业科学,2006,42(7):137–140,151.
PANG Yong, YU Xinfang, LI Zengyuan, et al. Extraction of waveform length from spaceborne LiDAR and analysis of forestry application potential[J]. Forestry Science, 2006,42(7): 137–140,151. (in Chinese)
- [20] 胡国军,方勇,张丽.星载激光雷达的发展与测绘应用前景分析[J].测绘技术装备,2015,17(2):34–37.
HU Guojun, FANG Yong, ZHANG Li. Analysis of the development and surveying application prospects of spaceborne LiDAR [J]. Surveying Technology and Equipment, 2015,17(2): 34–37. (in Chinese)
- [21] 胥喆,舒清态,杨凯博,等.星载激光雷达在林业上的应用研究进展[J].福建林业科技,2017,44(1):141–148.
XU Zhe, SHU Qingtai, YANG Kaibo, et al. Research progress on the application of spaceborne LiDAR in forestry [J]. Fujian Forestry Science and Technology, 2017, 44(1): 141–148. (in Chinese)
- [22] 庞勇,李增元,陈博伟,等.星载激光雷达森林探测进展及趋势[J].上海航天,2019,36(3):20–28.
PANG Yong, LI Zengyuan, CHEN Bowei, et al. Progress and trends in spaceborne LiDAR forest detection[J]. Shanghai Aerospace, 2019,36(3): 20–28. (in Chinese)
- [23] 庞勇,李增元,余涛,等.森林碳储量遥感卫星现状及趋势[J].航天返回与遥感,2022,43(6):1–15.
PANG Yong, LI Zengyuan, YU Tao, et al. Current status and trends of forest carbon storage remote sensing satellites[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2022, 43(6): 1–15. (in Chinese)
- [24] 李国元.对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践[D].武汉:武汉大学,2017.
LI Guoyuan. The processing method and engineering practice of laser altimeter data for earth observation satellites [D]. Wuhan: Wuhan University,2017. (in Chinese)
- [25] NEUMANN T A, BRENNER A, HANCOCK D, et al. ICE, CLOUD, and land elevation satellite-2 (ICESat-2) project algorithm theoretical basis document (ATBD) for global geolocated photons ATL03[EB/OL]. <https://nsidc.org/data/icesat-2/products/level-2>.
- [26] MAGRUDER L A, BRUNT K M. Performance analysis of airborne photon-counting LiDAR data in preparation of ICESat-2 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 99: 1–8.
- [27] NEUENSCHWANDER A, PITTS K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 221:247–259.
- [28] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, et al. The ICE, CLOUD, and land elevation satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260–273.
- [29] VERNIMMEN R, HOOIJER A, PRONK M. New ICESat-2 satellite LiDAR data allow first global lowland DTM suitable for accurate coastal flood risk assessment[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2827.
- [30] VITEZSLAV M, KATERINA G, LUKAS G, et al. Effects of environmental conditions on ICESat-2 terrain and canopy heights

- retrievals in Central European mountains[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 279: 113112.
- [31] NEUENSCHWANER A L, MAGRUDER L A. Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: a first look[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1721.
- [32] SUJIT M G, MUKUNDA D B, SOMNATH P. Canopy height estimation using sentinel series images through machine learning models in a mangrove forest[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1519.
- [33] MONTESANO P M, ROSETTE J, SUN G. The uncertainty of biomass estimates from modeled ICESat-2 returns across a boreal forest gradient[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 95-109.
- [34] NARINE L L, POPESCU S, NEUENSHWANDER A, et al. Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 1-11.
- [35] MENG L, SORIN P, LONESOME M. Feasibility of burned area mapping based on ICESat-2 photon counting data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 24.
- [36] PARRISH C E, MAGRUDER A, NEUENSHWANDER N, et al. Validation of ICESat-2 atlas bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1634.
- [37] BRUNT K M, NEUMANN T A, LARSEN C F. Assessment of altimetry using ground-based GPS data from the 88S Traverse, Antarctica, in support of ICESat-2[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(2): 579-590.
- [38] SHEN X, KE C, YU X, et al. Evaluation of Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) land ice surface heights using Airborne Topographic Mapper (ATM) data in Antarctica[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 42(7): 2556-2573.
- [39] FAIR Z, FLANNER M, BRUNT K, et al. Using ICESat-2 and operation IceBridge altimetry for supraglacial lake retrieval[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14: 4253-4263.
- [40] SUN X, BLAIR J B, BUFTON J L, et al. Advanced silicon avalanche photodiodes on NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) mission[C]//*Photonic Instrumentation Engineering*, SPIE, 2020, 11287: 238-248.
- [41] AGUILAR F, RODRÍGUEZ F, AGUILAR M, et al. Forestry applications of space-borne LiDAR sensors: a worldwide bibliometric analysis[J]. *Sensors*, 2024, 24: 1106.
- [42] MICHELLE H, BRYAN B. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for GEDI transmit and receive waveform processing for L1 and L2 products[EB/OL]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/581/GEDI_WF_ATBD_v1.0.pdf.
- [43] TANG H, JOHN A. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for GEDI L2B footprint canopy cover and vertical profile metrics[EB/OL]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/588/GEDI_FCCVPM_ATBD_v1.0.pdf.
- [44] JAMES R, JOHN A, LAURA D, et al. Algorithm theoretical basis document for GEDI footprint aboveground biomass density[EB/OL]. <https://eartharxiv.org/repository/view/3514/>.
- [45] NARIN O, ABDIKAN S, GULLU M, et al. Improving global digital elevation models using space-borne GEDI and ICESat-2 LiDAR altimetry data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2316113.
- [46] NARIN O G, GULLU M. A comparison of vertical accuracy of global DEMs and DEMs produced by GEDI, ICESat-2[J]. *Earth Science Informatics*, 2023, 16: 2693-2707.
- [47] MARKUS A, MIKHAIL U, CLÉMENCE D, et al. Accuracy assessment of GEDI terrain elevation and canopy height estimates in European temperate forests: influence of environmental and acquisition parameters[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3948.
- [48] QI W, DUBAYAH R O. Combining Tandem-X InSAR and simulated GEDI LiDAR observations for forest structure mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 253-266.
- [49] POTAPOV P, LI X, HERNANDEZ-SERNA A, et al. Map global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112165.
- [50] WANG S, LIU C, LI W, et al. Hybrid model for estimating forest canopy heights using fused multimodal spaceborne LiDAR data and optical imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 122: 103431.
- [51] LI X, LI L, NI W, et al. Validating GEDI tree canopy cover product across forest types using co-registered aerial LiDAR data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 207: 326-337.
- [52] WANG Y, FANG H, ZHANG Y, et al. Retrieval and validation of vertical LAI profile derived from airborne and spaceborne LiDAR data at a deciduous needleleaf forest site[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2023, 60(1): 2214987.
- [53] LIANG L, SHANG R, CHEN J M, et al. Improved estimation of the underestimated GEDI footprint LAI in dense forests[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2023: 1-16. (Early Access)
- [54] WANG C, ZHANG W, JI Y, et al. Estimation of aboveground biomass for different forest types using data from Sentinel-1, Sentinel-2, ALOS PALSAR-2, and GEDI[J]. *Forests*, 2024, 15(1): 215.
- [55] SOLBERG S, BOLLANDSÅS O M, GOBAKKEN T, et al. Biomass change estimated by tandem-x interferometry and GEDI in a Tanzanian forest[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(5): 861.
- [56] CROCKETT E T, ATKINS J W, GUO Q, et al. Structural and species diversity explain aboveground carbon storage in forests across the United States: evidence from GEDI and forest inventory data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 295: 113703.

[57] JHA N, HEALEY S P, YANG Z, et al. Vicarious calibration of GEDI biomass with Landsat age data for understanding secondary forest carbon dynamics[J]. Environmental Research Letters, 2024,19: 044062.

[58] HUETTERMANN S, JONES S, SOTO-BERELOV M, et al. Using Landsat time series and bi-temporal GEDI to compare spectral and structural vegetation responses after fire [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 122: 103403.

[59] LANDMANN T, SCHMITT M, EKIM B V, et al. Insect diversity is a good indicator of biodiversity status in Africa[J]. Communications Earth & Environment, 2023,4(1): 234.

[60] TANG X, XIE J, LIU R, et al. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(1): e2019EA000777.

[61] TANG H, XIE J, TANG X, et al. On-orbit radiometric performance of GF-7 satellite multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 886.

[62] 胡柳茹,唐新明,张智,等. 高分七号卫星多源遥感数据精度优化与评估[J]. 红外与激光工程,2022,51(6):230-239.
HU Liuru, TANG Xinming, ZHANG Zhi, et al. Precision optimization and evaluation of multi-source remote sensing data from GF-7 satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 230-239. (in Chinese)

[63] 伍煜,王恒,韩启金,等. 基于波形匹配的高分七号星载激光测高仪山地区域脚点定位方法研究[J]. 红外与毫米波学报,2022,41(6):1051-1061.
WU Yu, WANG Heng, HAN Qijin, et al. Research on domain footpoint localization method of GF-7 spaceborne laser altimeter in mountain area based on waveform matching[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(6): 1051-1061. (in Chinese)

[64] 赵文普,刘钰,吴晓春,等. 利用高分七号卫星开展 1:10000 立体测图精度验证[J]. 测绘科学,2022,47(1):165-171,180.
ZHAO Wenpu, LIU Yu, WU Xiaochun, et al. Verification of accuracy of 1:10000 stereo mapping using GF-7 satellite[J]. Surveying and Mapping Science, 2022, 47(1): 165-171,180. (in Chinese)

[65] CHEN J, ZHANG B, TANG X, et al. On-orbit geometric calibration and accuracy validation for laser footprint cameras of GF-7 satellite[J]. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1408.

[66] REN C, XIE J, ZHI X, et al. Laser spot center location method for Chinese spaceborne GF-7 footprint camera[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2319.

[67] LIU R, XIE J, XU C, et al. A separate calibration method of laser pointing and ranging for the GF-7 satellite laser that does not require field detectors[J]. Remote Sensing, 2022, 14(23): 5935.

[68] LUO H, HE B, GUO R, et al. Urban building extraction and modeling using GF-7 DLC and mux images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3414.

[69] ZHOU P, TANG X. Geometric accuracy verification of GF-7 satellite stereo imagery without GCPs[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.

[70] CHEN J, TANG X, XUE Y, et al. Registration and combined adjustment for the laser altimetry data and high-resolution optical stereo images of the GF-7 satellite[J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1666.

[71] LI G Y, TANG X, CHEN J, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1338.

[72] LI G, GUO J, TANG X, et al. Preliminary quality analysis of GF-7 satellite laser altimeter full waveform data[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 43: 129-134.

[73] ZHU X, TANG X, ZHANG G, et al. Accuracy comparison and assessment of DSM derived from GFDM satellite and GF-7 satellite imagery[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4791.

[74] DU L, PANG Y, NI W, et al. Forest terrain and canopy height estimation using stereo images and spaceborne LiDAR data from GF-7 satellite[J]. Geo-spatial Information Science, 2023: 1-11. (Early Access)

[75] ZHU X, REN Z, NIE S, et al. DEM generation from GF-7 satellite stereo imagery assisted by space-borne LiDAR and its application to active tectonics[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1480.

[76] 曹海翔,张新伟,邱心怡,等. 遥瞰山河拱卫九重——陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”[J]. 自然资源科普与文化, 2023(2):14-21.
CAO Haiyi, ZHANG Xinwei, QIU Xinyi, et al. Remote view of mountain and river arches-land ecosystem carbon monitoring satellite “Goumang”[J]. Natural Resources Science and Culture, 2023(2): 14-21. (in Chinese)

[77] 曹海翔,张新伟,黄缙,等. 陆地生态系统碳监测卫星系统设计与技术创新[J]. 中国空间科学技术,2023,43(6):112-124.
CAO Haiyi, ZHANG Xinwei, HUANG Jin, et al. Design and technological innovation of terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite systems[J]. China Space Science and Technology, 2023,43(6): 112-124. (in Chinese)

[78] 贺涛,国爱燕,黄缙,等. 陆地生态系统碳监测卫星“句芒”号概览[J]. 国际太空,2022(9):8-12.
HE Tao, GUO Aiyang, HUANG Jin, et al. Overview of land ecosystem carbon monitoring satellite “Goumang” [J]. International Space Journal, 2022(9): 8-12 (in Chinese)

[79] 刘付强,卢清荣. 陆地生态系统碳监测卫星(句芒号)[J]. 卫星应用,2022(9):78.
LIU Fuqiang, LU Qingrong. Land ecosystem carbon monitoring satellite (Goumang)[J]. Satellite Applications, 2022 (9):

78. (in Chinese)
- [80] 刘洁,徐赫屿,张涛,等. 陆地生态系统碳监测卫星控制系统方案设计及在轨验证[J]. 空间控制技术与应用,2023,49(5):21-28.
LIU Jie, XU Heyu, ZHANG Tao, et al. Design and in orbit verification of a terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite control system scheme[J]. Space Control Technology and Applications, 2023,49(5):21-28. (in Chinese)
- [81] 汤天瑾,杨居奎,伏瑞敏,等. 陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达光学系统设计[J]. 航天返回与遥感,2022,43(6):36-49.
TANG Tianjin, YANG Jukui, FU Ruimin, et al. Design of multi beam LiDAR optical system for land ecosystem carbon monitoring satellite[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2022, 43(6):36-49. (in Chinese)
- [82] 岳春宇,周楠,杨舒琪,等. 陆地生态系统碳监测卫星植被测量量子系统无控定位方法[J]. 航天返回与遥感,2022,43(6):50-58.
YUE Chunyu, ZHOU Nan, YANG Shuqi, et al. Uncontrolled positioning method for vegetation measurement subsystem of terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2022, 43(6):50-58. (in Chinese)
- [83] 王伟刚,胡斌,杜国军,等. 陆地生态系统碳监测卫星日光诱导叶绿素荧光超光谱探测仪设计与验证[J]. 航天返回与遥感,2022,43(6):68-78.
WANG Weigang, HU Bin, DU Guojun, et al. Design and validation of a solar induced chlorophyll fluorescence hyperspectral detector for terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite[J]. Aerospace Return and Remote Sensing, 2022, 43(6):68-78. (in Chinese)
- [84] 陈新阳,龙小祥,李庆鹏,等. 陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版)2023;1-18. <http://ch.whu.edu.cn/article/id/a53e2845-2c25-4e50-b268-c0c8f9878ado>.
CHEN Xinyang, LONG Xiaoxiang, LI Qingpeng, et al. Data proccing and accuracy verification for laser altimeter of terrestrial ecosystem carbon inventory satellite [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023;1-18. (in Chinese)
- [85] 焦全军,郑焰锋,黄文江,等. 陆地生态系统碳监测卫星松材线虫病变色木识别指数研究[J]. 林业资源管理,2023(4):123-131.
JIAO Quanjun, ZHENG Yanfeng, HUANG Wenjiang, et al. Study on the identification index of pine wood nematode lesions by land ecosystem carbon monitoring satellite[J]. Forestry Resource Management, 2023(4):123-131. (in Chinese)
- [86] 王小燕,吕争,李俊杰,等. 陆地生态系统碳监测卫星句芒号及其应用[J]. 卫星应用,2023(7):18-22.
WANG Xiaoyan, LÜ Zheng, LI Junjie, et al. Land ecosystem carbon monitoring satellite Jumang and its applications[J]. Satellite Applications, 2023(7):18-22. (in Chinese)
- [87] 黄佳鹏. 基于 ICESat-2/ATLAS 光子计数 LiDAR 数据反演森林冠层高度研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2021.
HUANG Jiapeng. Research on forest canopy height inversion based on ICESat-2/ATLAS photon counting LiDAR data[D]. Harbin; Northeast Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [88] 董瀚元,于颖,范文义. 星载激光雷达 GEDI 数据林下地形反演性能验证[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):141-149.
DONG Hanyuan, YU Ying, FAN Wenyi. Performance verification of understory terrain inversion using spaceborne LiDAR GEDI data[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2023,47(2):141-149. (in Chinese)
- [89] WANG C, ELMORE A J, NUMATA I, et al. Factors affecting relative height and ground elevation estimations of GEDI among forest types across the conterminous USA[J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1):975-999.
- [90] LIU A, CHENG X, CHEN Z. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264:112571.
- [91] SUN Y, NIE S, LI G. Evaluation of the performance of GaoFen-7 laser altimeter data for ground elevation retrieval over vegetated areas[J]. Remote Sensing Letters, 2022,13(10):991-1001.
- [92] 王太平. 高分七号星载激光测高数据波形处理与定位精度优化技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2021.
WANG Taiping. Research on waveform processing and positioning accuracy optimization technology for laser altimetry data on GaoFen-7 satellite[D]. Wuhan;Wuhan University, 2021. (in Chinese)
- [93] 韩明辉,邢艳秋,李国元,等. GEDI 不同算法组数据反演森林最大冠层高度和生物量精度比较[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(10):72-82.
HAN Minghui, XING Yanqiu, LI Guoyuan, et al. Comparison of the accuracy of forest maximum canopy height and biomass inversion by different algorithm groups of GEDI[J]. Journal of Central South University of Forestry, 2022, 42(10):72-82. (in Chinese)
- [94] 袁鸢慧,聂胜,张合兵,等. GEDI 地面高程和森林冠层高度的精度评价与影响分析[J]. 遥感技术与应用,2022,37(5):1056-1070.
YUAN Zhihui, NIE Sheng, ZHANG Hebing, et al. Accuracy evaluation and impact analysis of GEDI ground elevation and forest canopy height[J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2022, 37(5):1056-1070. (in Chinese)

- [95] 朱笑笑. 基于 ICESat-2 和 GEDI 数据的中国 30 米分辨率森林高度反演研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2021.
ZHU Xiaoxiao. Retrieval of China's 30 m resolution forest height based on ICESat-2 and GEDI data[D]. Beijing:University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [96] PANG S, LI G, JIANG X, et al. Retrieval of forest canopy height in a mountainous region with ICESat-2 ATLAS[J]. *Forest Ecosystems*, 2022, 9: 100046.
- [97] 陈贵珍,黄杨,赵晓伟,等. 基于 GEDI、Sentinel-2 和机载激光雷达的森林冠层高度反演研究[J]. *测绘与空间地理信息*,2022,45(增刊):235-238.
CHEN Guizhen, HUANG Yang, ZHAO Xiaowei, et al. Research on forest canopy height inversion based on GEDI, Sentinel-2, and airborne LiDAR[J]. *Surveying and Spatial Geographic Information*, 2022,45(Supp.): 235-238. (in Chinese)
- [98] 刘丽娟. 基于星载激光雷达数据和光学遥感数据的云南省森林冠层高度反演研究[D]. 昆明:云南师范大学,2022.
LIU Lijuan. Research on forest canopy height inversion in Yunnan Province based on spaceborne LiDAR data and optical remote sensing data[D]. Kunming:Yunnan Normal University, 2022. (in Chinese)
- [99] ZHOU X C, HAO Y Z, DI L P, et al. Improving GEDI forest canopy height products by considering the stand age factor derived from time-series remote sensing images: a case study in Fujian, China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 467.
- [100] FOLHARINI S, DOS SANTOS S M B, BENTO-GONÇALVES A, et al. Estimation of tree height in burned areas with GEDI laser data in Northern Portugal and Galicia (Spain)[J]. *Environmental Sciences Proceedings*, 2022, 22(1): 50.
- [101] XI Z, XU H, XING Y Q, et al. Forest canopy height mapping by synergizing ICESat-2, Sentinel-1, Sentinel-2 and topographic information based on machine learning methods[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 364.
- [102] LIN X, XU M, CAO C, et al. Estimates of forest canopy height using a combination of ICESat-2/ATLAS data and stereo-photogrammetry[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3649.
- [103] MOHAMED M, SINGH G, KUMAR P. Comparison of forest stand height interpolation of GEDI and ICESat-2 LiDAR measurements over tropical and sub-tropical forests in India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 195(1):71.
- [104] SOTHE C, GONSAMO A, LOURENÇO R B, et al. Spatially continuous mapping of forest canopy height in Canada by combining GEDI and ICESat-2 with PALSAR and Sentinel[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 51-58.
- [105] CHEN J M, BLACK T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15(4): 421-429.
- [106] FANG H, BARET F, PLUMMER S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 739-799.
- [107] GUO D, RONGHAI H, SONG X N, et al. Exploring photon-counting laser altimeter ICESat-2 in retrieving LAI and correcting clumping effect[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-9.
- [108] ZHANG J, TIAN J, LI X, et al. Leaf area index retrieval with ICESat-2 photon counting LiDAR[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102488.
- [109] WANG C, JIA D, LEI S, et al. Accuracy assessment and impact factor analysis of gedi leaf area index product in temperate forest[J]. *Remote Sens.*, 2023, 15: 1535.
- [110] NARINE L L, POPESCU S C, MALAMBO L. A methodological framework for mapping canopy cover using ICESat-2 in the southern USA[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15: 1548.
- [111] BROWN S, LUGO A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes[J]. *Science*, 1984, 223(4642): 1290-1293.
- [112] AARDT J A N, WYNNE R H, ODERWALD R G. Forest volume and biomass estimation using small-footprint LiDAR-distributional parameters on a per-segment basis[J]. *Forest Science*, 2006, 52(6): 636-649.
- [113] 刘美艳,聂胜,王成,等.基于 ICESat-2 和 Sentinel-2A 数据的森林蓄积量反演[J]. *自然资源遥感*,2024,36(1):210-216.
LIU Meiyang, NIE Sheng, WANG Cheng, et al. Forest volume inversion based on ICESat-2 and Sentinel-2A data[J]. *Natural Resources Remote Sensing*, 2024,36(1): 210-216. (in Chinese)
- [114] FANG J, WANG G G, LIU G, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1084-1091.
- [115] HOUGHTON R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.
- [116] XU L, SHU Q T, FU H Y, et al. Estimation of Quercus biomass in Shangri-La based on GEDI spaceborne LiDAR data[J]. *Forests*, 2023, 14(5): 876.
- [117] CHEN L, REN C, ZHANG B, et al. Improved object-based mapping of above-ground biomass using geographic stratification with GEDI data and multi-sensor imagery[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15:2625.
- [118] ZHAO X, HU W, HAN J, et al. Urban above-ground biomass estimation using GEDI laser data and optical remote sensing images[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16: 1229.
- [119] NARINE L L, POPESCU S C, MALAMBO L. Using ICESat-2 to estimate and map forest aboveground biomass: a first

- example[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1824.
- [120] SONG H, XI L, SHU Q, et al. Estimate forest aboveground biomass of mountain by ICESat - 2/ATLAS data interacting cokriging[J]. *Forests*, 2023, 14:13.
- [121] DENG Y, PAN J, WANG J, et al. Mapping of forest biomass in Shangri - La city based on LiDAR technology and other remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14: 5816.
- [122] JIA W, PANG Y, TORTINI R. The influence of BRDF effects and representativeness of training data on tree species classification using multi-flightline airborne hyperspectral imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 207: 245 - 263.
- [123] ZHANG H, ZHANG Y, LIU K, et al. Winter wheat yield prediction using integrated Landsat 8 and Sentinel - 2 vegetation index time-series data and machine learning algorithms[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108250.
- [124] CHEN S, XIAO P, ZHANG X, et al. Simulating snow-covered forest bidirectional reflectance by extending hybrid geometric optical-radiative transfer model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 296: 113713.
- [125] DING A, JIAO Z, ZHANG X, et al. A practical approach to improve the MODIS MCD43A products in snow-covered areas [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2023, 3: 57.
- [126] NASIRI V, BELOIU M, DARVISHSEFAT A, et al. Mapping tree species composition in a Caspian temperate mixed forest based on spectral-temporal metrics and machine learning [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 116: 103154.
- [127] WEGMULLER U, WERNER C L. SAR interferometric signatures of forest[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1153 - 1161.
- [128] LAPINI A, PETTINATO S, SANTI E, et al. Comparison of machine learning methods applied to SAR images for forest classification in mediterranean areas[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 369.
- [129] VARGHESE A O, SURYAVANSHI A, JOSHI A K. Analysis of different polarimetric target decomposition methods in forest density classification using C band SAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(3): 694 - 709.
- [130] GE S, ANTROPOV O, HÄME T, et al. Deep learning model transfer in forest mapping using multi-source satellite SAR and optical images[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(21): 5152.
- [131] TOWNSEND P A. Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetlands using C-band SAR[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(3): 443 - 460.
- [132] VARGHESE A O, JOSHI A K. Polarimetric classification of C-band SAR data for forest density characterization[J]. *Current Science*, 2015, 108(1): 100 - 106.
- [133] TELLO M, CAZCARRA-BES V, PARDINI M, et al. Forest structure characterization from SAR tomography at L-band[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3402 - 3414.
- [134] YU Y, SAATCHI S. Sensitivity of L-band SAR backscatter to aboveground biomass of global forests[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 522.
- [135] CAZCARRA-BES V, TELLO-ALONSO M, FISCHER R, et al. Monitoring of forest structure dynamics by means of L-band SAR tomography[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1229.
- [136] PERKO R, RAGGAM H, DEUTSCHER J, et al. Forest assessment using high resolution SAR data in X-band[J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(4): 792 - 815.
- [137] SANTORO M, CARTUS O, FRANSSON J E S, et al. Complementarity of X-, C-, and L-band SAR backscatter observations to retrieve forest stem volume in boreal forest[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1563.
- [138] SCHLUND M, DAVIDSON M W J. Aboveground forest biomass estimation combining L-and P-band SAR acquisitions[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1151.
- [139] QUEGAN S, LE TOAN T, CHAVE J, et al. The European Space Agency BIOMASS mission: measuring forest above-ground biomass from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 227: 44 - 60.
- [140] KUMAR P, KRISHNA A P. Forest biomass estimation using multi-polarization SAR data coupled with optical data[J]. *Current Science*, 2020, 119(8): 1316 - 1321.
- [141] GU X Z, CHEN E X, LI Z Y, et al. Forest cover change detection method using multi-polarization space-borne SAR[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(5): 74 - 84.
- [142] RAUSTE Y. Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 263 - 275.
- [143] HAARPAINTNER J, HINDBERG H. Multi-temporal and multi-frequency sar analysis for forest land cover mapping of the Mai-Ndombe district (Democratic Republic of Congo)[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 2999.
- [144] MOHAMMADIMANESH F, SALEHI B, MAHDIANPARI M, et al. Multi-temporal, multi-frequency, and multi-polarization coherence and SAR backscatter analysis of wetlands[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 142: 78 - 93.