

基于 GEDI 波形数据的不同季节森林冠层高度估测

蔡龙涛¹ 何家胜¹ 吴 军¹ 韩雪蓉² 王 玉³ 邢泽坤¹

(1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 桂林 541004; 2. 广西壮族自治区生态环境监测中心, 南宁 530012;
3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要:为解决星载 LiDAR(Light laser detection and ranging)GEDI(Global ecosystem dynamics investigation)发射波激光脉冲难以穿透密林区森林冠层从而精准获取林下地形信息,以及在高坡度地形会增加 GEDI 林分冠层回波与林下地形回波重叠度进而难以高精度估测森林冠层高度的问题,结合冬季阔叶林落叶特性及 GEDI 发射波激光脉冲有强穿透性的特点,对 GEDI 波形长度参数按照不同季节森林构建冠层高度估测模型,分析 GEDI 不同百分比波形长度参数 $r_{h_{aN}}$ 在夏季、冬季森林冠层高度估测精度;之后引入地形坡度因子 DTM 数据修正森林冠层高度估测模型,分坡度估测森林冠层高度,解决由高坡度地形引起的林分冠层回波与林下地形回波重叠导致森林冠层高度估测精度偏低问题。研究结果表明,夏季森林冠层高度估测决定系数 R^2 为 0.573,均方根误差(RMSE)为 3.695 m;冬季估测 R^2 为 0.633, RMSE 为 3.671 m;冬季森林冠层高度估测模型经地形坡度校正后整体估测精度 R^2 为 0.709, RMSE 为 3.271 m。冬季森林冠层高度估测精度明显优于夏季,且引入地形坡度因子后能有效提高不同地形坡度条件下森林冠层高度估测精度。

关键词: 森林冠层高度; 季节; 地形坡度; GEDI

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)04-0325-10

OSID:



Estimation of Forest Canopy Height in Different Seasons Based on GEDI Waveform Data

CAI Longtao¹ HE Jiasheng¹ WU Jun¹ HAN Xuerong² WANG Yu³ XING Zekun¹

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Ecological Environment Monitoring Center, Nanning 530012, China

3. Satellite Environment Application Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming to solve the problem that it is difficult for spaceborne light laser detection and ranging (LiDAR) global ecosystem dynamics investigation (GEDI) emitted laser pulses to penetrate the forest canopy in dense forest areas to accurately obtain understory terrain information, and the overlap between GEDI stand canopy echo and understory terrain echo will be increased in high-slope terrain, and it is difficult to estimate forest canopy height with high accuracy, combined with the characteristics of defoliation in winter broad-leaved forest and the strong penetration advantage of GEDI emitted wave laser pulse, a model of forest canopy overestimation in different seasons was constructed by using the GEDI waveform length parameters. The accuracy of forest canopy height estimation in summer and winter was analyzed by using different percentage waveform length parameters ($r_{h_{aN}}$) of GEDI. Subsequently, terrain slope factor DTM data was introduced to correct the forest canopy height estimation model, segmenting forest canopy height estimation based on terrain slope, thereby addressing the problem of low accuracy in forest canopy height estimation caused by the overlap between canopy echoes and terrain echoes due to steep terrain. The research results showed that the coefficient of determination R^2 of forest canopy height estimation accuracy in summer was 0.573, with root mean square error (RMSE) of

收稿日期: 2024-09-04 修回日期: 2024-09-26

基金项目: 广西科技基地和人才专项(PD230069)、2023年博士后专项(C23RSC90BX05)、第四批广西博士后创新支持计划专项(C22RSC90BX07)、高校科研启动专项(UF22019Y)和桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2023YCX5133)

作者简介: 蔡龙涛(1990—),男,博士生,主要从事林业定量遥感研究, E-mail: 2550582400@qq.com

通信作者: 吴军(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事摄影测量与遥感研究, E-mail: 2653272289@qq.com

3.695 m; in winter, the R^2 was 0.633, with RMSE of 3.671 m. After correcting the forest canopy height estimation model with terrain slope, the overall estimation accuracy in winter, with R^2 of 0.709 and RMSE of 3.271 m, was significantly improved. Accuracy of forest canopy height estimation in winter was markedly better than in summer, and the introduction of terrain slope factors effectively enhanced the accuracy of forest canopy height estimation under different terrain slope conditions.

Key words: forest canopy height; season; topographic slope; GEDI

0 引言

森林作为陆地生态系统的主体,总面积已达 $3.815 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ^[1],碳储量约 $6.62 \times 10^9 \text{ t}$,每年可吸收二氧化碳 $2 \times 10^9 \text{ t}$,在调节气候^[2]、维护生态多样性^[3]、促进碳循环^[4]等方面具有重要作用。但由于工业的迅速发展以及人类对生态环境的大肆破坏,全球森林面积正在逐渐减小^[5]。虽然国际已出台如《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》和《巴黎协定》等多种森林保护政策^[6-7],但森林面积减小趋势仍未改变^[8]。在2030年碳达峰、2060年碳中和国家重大战略决策愿景条件下,森林作为促进碳吸收、降低大气二氧化碳排放量最为经济、有效、安全的重要载体,有必要对森林资源进行高精度动态监测以实现森林资源的科学管理和有效保护。

森林冠层高度在度量森林结构变化^[9]、精确估测森林生物量^[10-11]、衡量森林生态系统碳汇能力^[12]方面具有重要作用,对森林冠层高度的估测研究是促进森林资源动态监测的重要手段^[13]。现有森林资源监测手段中,星载 LiDAR 作为主动遥感技术^[14],其激光脉冲在穿透林分冠层获取林下地形信息方面具有其他遥感监测手段无可比拟的优势^[15],已广泛应用于森林冠层高度^[16]、叶面积指数^[17]、林分郁闭度^[18]以及森林生物量^[19]等参数估测研究。

自第一颗全波形星载 LiDAR 对地监测卫星 ICESat/GLAS (Ice, cloud, and land elevation satellite/Geoscience laser altimeter system)发射后,基于星载 LiDAR 波形数据对森林冠层高度估测研究已逐渐成为热点^[20-21]。如 SUN 等^[22]利用 GLAS 回波四分位数波形能量高度对森林冠层高度进行了估测研究,但该研究并未考虑地形坡度对森林冠层高度估测精度的影响。LEFSKY 等^[23]基于 GLAS 波形数据估测森林冠层高度时引入地形坡度 SRTM (Shuttle radar topography mission)数据,虽然提高了森林冠层高度估测精度,但地形修正因子数据来源与 GLAS 波形数据非同一直坐标系,数据之间存在定位误差。因此,邱赛^[24]基于 GLAS 波形数据提取出地形坡度因子(Terrain slope parameter, TS),实现了森林冠层高度的高精度估测,但该研究并未分析不同地形坡度对森林冠层高度估测精度的影响。此

外, GLAS 发射波激光脉冲在地面水平投影为直径 70 m 的正圆,即便在林分郁闭度较大的密林区 GLAS 发射波激光脉冲同样易穿透林分冠层获取林下地形信息^[25-26]。而自2018年12月5日 GEDI 对地监测卫星发射后,全波形星载 LiDAR 对地监测卫星空间分辨率从 70 m 下降到 25 m,且光斑波束也从单波束增加到 8 波束^[27-28]。如韩明辉等^[29]利用 4 波束 GEDI 回波对森林冠层高度进行了估测研究,但该研究并未分析地形坡度对森林冠层高度估测精度影响。RISHMAWI 等^[30]通过利用相对高度(Relative height, RH) $r_{h_{100}}$ 完成了森林冠层高度估测,但并未分析 $r_{h_{aN}}$ 参数不同百分比对森林冠层高度估测精度的影响。KUMAR 等^[31]基于 GEDI 波形数据对森林冠层高度估测时未考虑季节因素的影响。

为解决密林区 GEDI 发射波激光脉冲无法穿透林分冠层精确获取林下地形信息,以及由高坡度地形引起的 GEDI 回波波形展宽和林分冠层回波与林下地形回波波形重叠问题,本研究拟结合研究区冬季阔叶树落叶后可降低林分郁闭度从而能够精确获取林下地形信息特性,对研究区内夏季、冬季森林冠层高度进行估测研究;之后融合国家生态观测站网络(The National Science Foundation's National Ecological Observatory Network, NEON)提供的数字地形模型(Digital terrain model, DTM)作为地形坡度校正参数修正森林冠层高度估测模型,对不同地形坡度条件下森林冠层高度进行估测,探究适用于 GEDI 波形数据精准估测森林冠层高度的技术方法,为后续星载 LiDAR 波形数据森林冠层高度估测研究提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概括

研究区位于美国弗吉尼亚州(Virginia)(37.32°~37.44°N, 80.46°~80.60°W,图1),属于亚热带湿润气候,夏季气温多低于 32℃,冬季气温可低至 -18℃,年平均气温 8.8℃,地势由西向东倾斜,年平均降水量约 1 227 mm,总面积 169 km²,地形坡度为 0°~50°,地面高程为 599~1 329 m,平均海拔为 1 170 m。

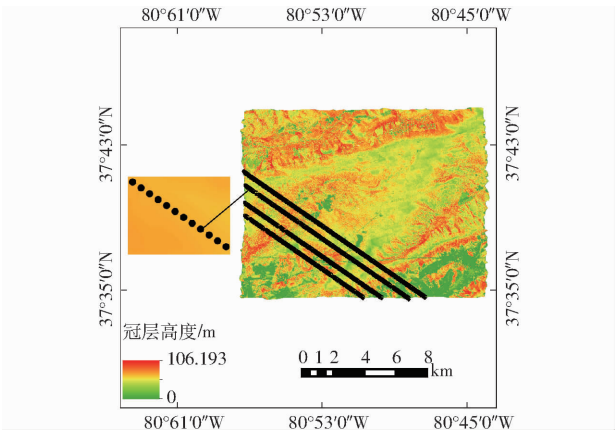


图 1 研究区 GEDI 光斑点分布示意图

Fig. 1 Schematic of GEDI laser points distribution in study area

研究区森林覆盖率为 65%，林区内典型植被为落叶林和阔叶林，主要包括红枫 (*Acer palmatum* Thunb. F. *Atropurpureum* (Van Houtte) Schwer.)、白橡树 (*Quercus fabri* Hance)、火炬松 (*Pinus taeda* Linn.) 和短叶松 (*Pinus banksiana* Lambert)。其他常见的树木包括云杉 (*Picea asperata* Mast.)、杨树 (*Populus* L.)、山茱萸 (*Cornus officinalis* Sieb. et Zucc.)、柳树 (*Salix*)、金缕梅 (*Hamamelis mollis* Oliv.)、白松 (*Pinus armandii*) 和月桂 (*Laurus nobilis* L.) 等。

1.2 研究数据

1.2.1 GEDI 数据

GEDI 任务为观测地球的三维结构,测量森林冠层高度,以及从根本上提高描述碳和水循环过程、生物多样性和栖息地的能力,可实现纬度 51.6°N ~ 51.6°S 之间全球生态系统的动态变化监测。卫星载荷参数见表 1。

表 1 GEDI 卫星载荷参数

Tab. 1 GEDI satellite payload parameters

参数	数值
轨道高度/km	410
激光束数量	3
轨道数量	8
覆盖范围	51.6°S ~ 51.6°N
预定运行时间/a	2
发射频率/Hz	242
足印直径/m	25
轨道间隔/m	60
异轨间隔/m	600
地理定位误差/m	8
波长/nm	1 064
发射波波形长度/ns	128
发射波脉冲半波宽度/ns	15
发射波能量/mJ	10(强波束),5(弱波束)
采样间隔/ns	1

GEDI 卫星发射器由 3 个近红外激光器组成,其中 2 个为全功率激光器,可由光束抖动单元 (Beam dither units, BDU) 光学抖动改变激光器发射的激光束偏转将 2 个激光束分成 4 个激光强波束;另外一个为半功率激光器,其激光束被拆分为 2 个波束后再由 BDU 光学抖动偏转反射将 2 个光束分成 4 个激光弱波束。3 个激光器在地面共产生 8 个地面轨道 (图 2)。

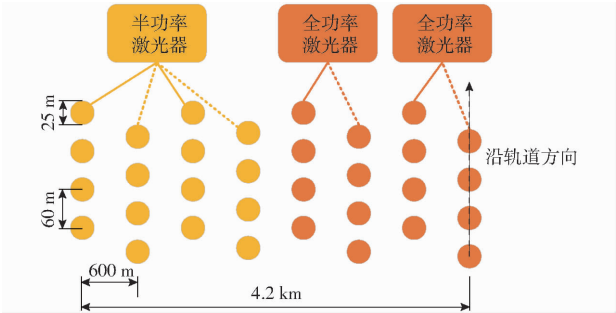


图 2 GEDI 激光器地面采样示意图

Fig. 2 Schematic of ground sampling of GEDI lasers

由 8 个轨道获取的 GEDI 波形数据经 NASA 团队数据处理后依据数据存储类型可将 GEDI 产品文件分为 4 个级别,各级别产品内容见表 2。

表 2 GEDI 产品文件信息

Tab. 2 GEDI product document information

产品文件	数据产品	分辨率/m
L1A	原始波形	25
L1B	定位后波形数据	25
L2A	地面高程、冠层顶高度、相对高度 (RH) 指标	25
L2B	冠层覆盖率 (CCF)、叶面积指数 (LAI)	25
L3	网格化 2 级指标	1 000 (网格)
L4A	地上生物量足迹	25
L4B	网格化地上生物量密度	1 000 (网格)

考虑到 GEDI 弱波束发射波能量低、易受大气噪声干扰,进而导致其激光脉冲难以穿透林分冠层获取林下地形信息及 GEDI 回波波形数据信噪比较低等因素,分别选用 2021 年 7、12 月 GEDI 强波束回波作为夏季、冬季研究数据,对不同季节森林冠层高度进行估测研究,以分析季节对森林冠层高度估测影响,实现森林结构参数的高精度估测。

1.2.2 NEON 数据

NEON 是一个利用机载观测平台 (Airborne observation platform, AOP) 长期收集美国生态系统变化的监测系统。目前拥有 81 个观测点,主要记录 3 种数据:机载遥感数据、自动仪器数据和观测采样数据。其中机载遥感数据可通过机载观测平台 (AOP) 进行数据采集,AOP 包括 3 个独立的商用激光雷达系统,其中 2 个为 Optech Geminis 系统,另一

个为 Riegl LMS - Q780 系统,可记录波形激光雷达数据和离散点云激光雷达数据。本文主要采用 Optech Geminis 系统(仪器载荷参数见表 3,探测器类型为离散返回)LiDAR 点云数据生成的冠层高度模型(CHM)、DTM 作为实测数据对研究结果进行验证。

表 3 离散点云机载 LiDAR 仪器参数

Tab.3 Discrete point cloud airborne LiDAR instrument parameters	
参数	数值
激光波长/nm	1 064(近红外)
激光能量/μJ	250
激光频率/kHz	33 ~ 167
飞行线设计重叠度/%	30
光斑直径/m	0.25(飞行高度 1 000 m 处)
全扫描角度/(°)	>36
采样密度/(点·m ⁻²)	2 ~ 8
水平精度/cm	<5 ~ 15
高程精度/cm	<5 ~ 35
产品分辨率/m	1

为探究季节对 GEDI 波形数据森林冠层高度估测影响,选用与 GEDI 波形数据相近时间段(2021 年 6 月)Optech Geminis 系统 CHM 产品数据和 DTM 产品数据以保证研究数据的统一性。数据可在网站(<https://data.neonscience.org/dataproducts/explore>)查询下载。

由于 NEON 数据森林冠层高度模型(CHM)数据空间分辨率为 1 m,与直径为 25 m 的 GEDI 光斑相差较大,因此通过 NEON 经纬度数据匹配到对应 GEDI 光斑中心点后,以该点为圆心,半径为 12.5 m 画圆,得到 486 个空间分辨率为 1 m 的 CHM 数据,并对 CHM 数据取均值作为 GEDI 光斑内树高实测值,以验证本研究 GEDI 波形数据森林冠层高度估测精度。

1.3 研究方法

1.3.1 GEDI 光斑数据筛选

GEDI 弱波束条件下发射波激光脉冲能量偏低,回波波形易受系统噪声、大气噪声等因素影响,不利于波形特征参数的精确提取,难以实现森林冠层高度精准估测。因此,选用 GEDI 强波束回波产品数据对森林冠层高度进行估测研究。此外,受云层、降雨以及雾霾等因素影响,GEDI 强波束回波中同样存在波形数据信噪比偏低波形。针对 GEDI 强波束回波波形数据信噪比偏低以致难以精确提取森林结构信息问题,结合 GEDI L2A 提供的数据质量字段参数对低质量 GEDI 波形数据进行剔除处理。

对 GEDI 高质量回波波形数据筛选过程中,发现 GEDI L2A 产品文件中每个波束均存在 548 个字

段,不同字段参数指代内容存在较大差异。主要利用 GEDI L2A 经度字段(lon_lowestmode_aN)和纬度字段(lat_lowestmode_aN)缩小 GEDI 光斑点对应区域;结合 GEDI 光斑号 shot_number 查找 GEDI L1B 对应光斑点回波波形;通过 quality_flag、degrade_flag 和 sensitivity 字段参数筛选高质量 GEDI 波形数据。其中,stale_return_flag 为过时返回标志,表示波形在从地面返回到接收器过程中因为云层或者其他物体阻挡,导致接收到回波信号的时间过长。stale_return_flag = 1 表明信号接收超时,应当剔除,stale_return_flag = 0 表明信号未超时,予以保留。degrade 为降轨标志,表示该波形信号是在轨道降级过程中获取,波形多为噪声数据。degrade = 1 表明信号是在轨道降级时获取,应当剔除,degrade = 0 则为未降轨,予以保留。quality_flag 为质量标志,表示该波形质量是否合格,quality_flag = 1 表明波形质量合格,予以保留。quality_flag = 0 表明波形基本为噪声信号,应当剔除。sensitivity 为灵敏度标志,表示非地面回波波形面积与总回波波形面积之比,在森林区域非地面回波多代表森林,其范围为 0 ~ 1,值越大表明该光斑点地物类型为森林可能性越大。森林地区 sensitivity 阈值要求在 0.9 以上,因此在对 GEDI 光斑点进行数据筛选过程中设定 sensitivit 大于等于 0.9。其中,常用 GEDI L2A 产品字段如表 4 所示。

表 4 GEDI L2A 产品数据筛选字段

Tab.4 Filter fields for GEDI L2A product data	
名称	含意
shot_number	光斑号
lat_lowestmode_aN	最低模式中心纬度
lon_lowestmode_aN	最低模式中心经度
elev_lowestmode_aN	最低返回高程
elev_highestreturn_aN	最高返回模型
rh_aN	相对高度,以 1% 间隔
mean_sea_surface	平均海平面
stale_return_flag	过时返回标志
degrade	降轨标志
quality_flag	质量标志

此外,研究区森林面积覆盖率为 65%,即存在地面为裸地或丘陵地形。针对不存在森林植被的 GEDI 光斑,主要结合 NEON 提供的 CHM 数据对 GEDI 光斑内森林冠层高度为零的光斑点剔除,以避免由非林地引起森林冠层高度估测精度偏低问题。

1.3.2 波形长度参数提取

为精确估测 GEDI 光斑点内森林冠层高度,选用 GEDI L2A 产品数据中的 r_h 字段参数作为波形长度参数,建立森林冠层高度估测模型。 r_h 字段数据包含 $r_{h,0} \sim r_{h,100}$ 以内不同百分比条件下 GEDI 波形

相对长度参数 $r_{h_{aN}}$, 具体提取公式为

$$r_{h_{aN}} = W_N - W_T \tag{1}$$

式中 W_N ——GEDI 回波波形对应帧高度

W_T ——GEDI 地面波峰点波形对应帧高度

其中 $r_{h_{aN}}$ 表示 GEDI 某一帧波形回波点、地面波峰回波点之间波形能量和与 GEDI 波形起波点、地面

波峰回波点能量和之比, 比值为 $N \times 1\%$ 时该帧为 GEDI 波形 $r_{h_{aN}}$ 参数对应高度。

参数提取示意图^[32] 见图 3, 深色部分表示地面回波, 浅色部分表示冠层回波, 黑色曲线表示波形归一化累计返回能量, RH 值表示所在归一化累计返回能量值对应的地上高程。

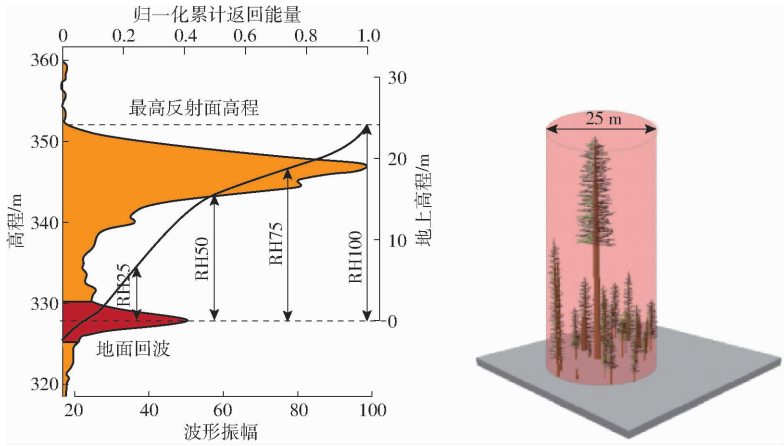


图 3 波形特征参数提取示意图
Fig. 3 Schematic of waveform feature parameter extraction

1. 3. 3 地形坡度校正

研究区地形主要由山地、丘陵组成, 地貌复杂多样且地形坡度较大($0^\circ \sim 50^\circ$), 使得基于 GEDI 波形数据对森林冠层高度估测时易受地形坡度影响, 导致 GEDI 地形回波在研究区存在不同程度的波形展宽, 从而降低 GEDI 波形结构参数识别及提取精度, 进而降低森林冠层高度估测精度。

星载激光雷达回波仿真原理模型为

$$E(t) = F(t) * G(t) \tag{2}$$

式中 $E(t)$ —— t 时刻回波波形振幅

$F(t)$ —— t 时刻激光发射脉冲函数值

$G(t)$ —— t 时刻地表响应函数值

$*$ ——卷积处理符号

结合式(2)对 GEDI 回波进行分析。当光斑内林地地形坡度为零时可将林地地面视为水平地面, GEDI 发射波激光脉冲经水平地面反射后回波波形与发射波波形近似一致, 故林地坡度为 0° 时 GEDI 地形回波与发射波波形宽度大致相等(图 4); 光斑内林地地形坡度非 0° 时, 地形在垂直尺度存在一定高程差(图 5), 使得 GEDI 发射波到达光斑经不同垂直高程的地面反射后的多个发射波在时间尺度存在一定间隔, 从而增大了 GEDI 地形回波在时间尺度上的运行距离, 导致非平坦林地 GEDI 地形回波存在波形长度展宽现象, 进而增大森林冠层高度精准估测难度。

基于此, 结合地形坡度因子(DTM)校正 GEDI 波形数据森林冠层高度估测模型, 修正因地形起伏

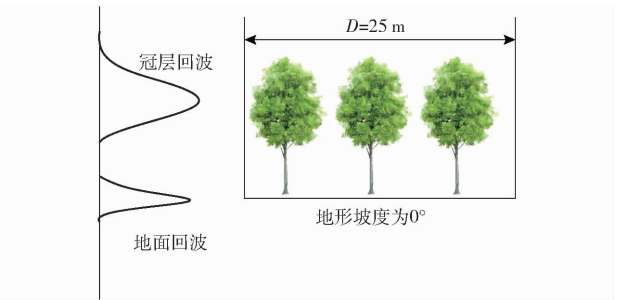


图 4 坡度为 0° 时 GEDI 回波示意图

Fig. 4 Schematic of GEDI at slope of 0°

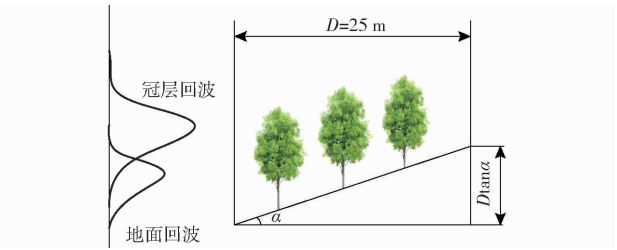


图 5 坡度为 α 时 GEDI 回波示意图

Fig. 5 Schematic of GEDI at slope of α

引起的 GEDI 回波波形展宽以及林分冠层回波、林下地形回波波形重叠导致高坡度条件下森林冠层高度估测精度偏低问题。森林冠层高度地形坡度校正前、后估测模型为

$$H = \begin{cases} ar_{h_{aN}} + c & (\text{校正前}) \\ ar_{h_{aN}} - bD\tan\alpha + c & (\text{校正后}) \end{cases} \tag{3}$$

式中 H ——森林冠层高度估测值, m

a, b, c ——森林冠层高度估测模型对应的系数

D ——GEDI 光斑点地面水平投影直径, 取 25 m

α ——GEDI 光斑区域内林地地形坡度

1.3.4 精度评估

考虑到研究区森林主要为天然林,森林冠层高度数据分布较为对称,树高估测值误差分布大致呈正态分布,故选用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)作为评价指标以实现基于 GEDI 波形数据对森林冠层高度估测结果的精确评价。其中,RMSE 越小表示森林冠层高度估测精度越高; R^2 越大表示相关性越高,森林冠层高度估测值与实测值越接近。

2 实验结果与分析

2.1 不同季节森林冠层高度

基于 GEDI L2A 产品 r_h 字段参数估测森林冠层高度时多采用 r_h 后半部分数据进行估测研究^[29-30,32]。为探究季节对 GEDI 波形数据森林冠层高度估测精度影响,并分析 r_h 后半部分不同百分比条件下森林冠层高度估测精度,基于 GEDI L2A 产品 r_h 字段后半部分不同百分比条件下波形长度参数分别对夏季(7月)和冬季(12月)森林冠层高度进行估测研究,以选取不同季节森林冠层高度最佳估测精度条件下 r_h 字段百分比数据。图 6 为冬季和夏季不同 r_h 字段百分比条件下森林冠层高度 R^2 、RMSE 估测结果。

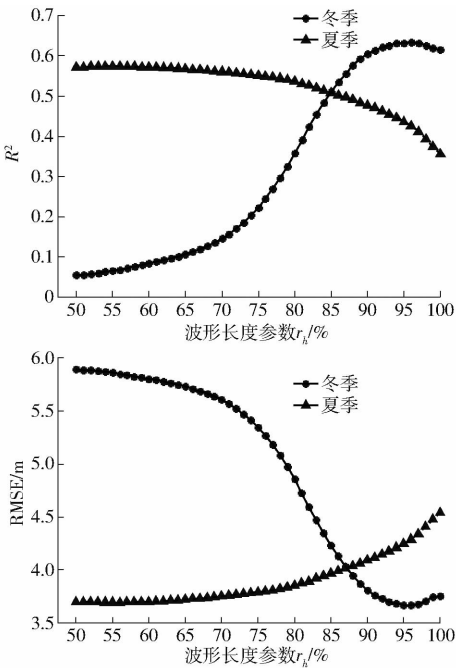


图 6 不同季节估测精度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of estimation accuracy across different seasons

如图 6 所示,夏季和冬季森林冠层高度估测精度 R^2 均随 r_h 增加呈先上升后下降趋势,RMSE 随 r_h 增大呈先下降后上升趋势。分析其原因:研究区夏

季林分枝叶繁茂、林层结构复杂,以致 GEDI 发射波激光脉冲难以穿透林分冠层获取林下地形信息,使得在波形数据处理过程中提取 r_h 参数时易将林分冠层回波点错误识别为地面回波波峰点,降低 r_h 参数提取精度;此外,研究区多为山地、丘陵地形,地形坡度为 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$,高坡度地形增大了 GEDI 光斑在垂直尺度覆盖范围并降低了地面在不同垂直层的投影面积,使得高坡度地形条件下 GEDI 地面回波波形振幅下降,而夏季繁茂的枝叶增大了林分冠层在不同垂直层的水平投影面积,增大了 GEDI 林分冠层回波波形振幅,易增加 r_h 参数提取过程中 GEDI 地面回波波峰点错误识别率,从而降低 r_h 参数提取精度;而且,由夏季高密度枝叶及研究区高坡度地形引起的林分冠层与林下地形 GEDI 回波展宽现象将增大波形起波点、止波点之间的帧数,且本文研究区夏季地形坡度在 15° 以上光斑点数量占比为 39.20%,导致夏季 $r_{h_{100}}$ 参数值远大于 GEDI 光斑内森林冠层高度值,使得在夏季基于 GEDI L2A 产品 r_h 参数对森林冠层高度估测时最佳估测结果 r_h 参数值偏低($r_{h_{56}}$),与 ADAM 等^[33]利用 $r_{h_{100}}$ 参数对 4—11 月图林根州森林冠层高度估测结果一致(R^2 为 0.343)。因此, r_h 小于 $r_{h_{56}}$ 时森林冠层估测精度随 r_h 增大而增大,大于 $r_{h_{56}}$ 时森林冠层估测精度随 r_h 增大而减小,估测精度见表 5。

表 5 夏季 r_h 参数森林冠层高度估测精度
Tab. 5 Estimation accuracy of forest canopy with r_h parameters in summer

相对高度	R^2	RMSE/m
$r_{h_{51}}$	0.572	3.700
$r_{h_{52}}$	0.573	3.698
$r_{h_{53}}$	0.573	3.696
$r_{h_{54}}$	0.573	3.695
$r_{h_{55}}$	0.573	3.696
$r_{h_{56}}$	0.573	3.695
$r_{h_{57}}$	0.573	3.696
$r_{h_{58}}$	0.573	3.697
$r_{h_{59}}$	0.572	3.699
$r_{h_{60}}$	0.572	3.702

研究区内存在大量落叶林和阔叶林,结合冬季落叶林和阔叶林落叶特性,GEDI 发射波激光脉冲能够穿透林分冠层精准获取林下地形信息。虽然高坡度地形(冬季地形坡度在 15° 以上光斑点数量占比为 49.7%)增加了 GEDI 回波波形起波点与止波点之间波形长度,容易降低 r_h 参数提取精度,但冬季 GEDI 回波精确获取林下地形信息特性使得在 GEDI 回波波形数据处理过程中能够提高林分冠层回波与林下地形回波识别精度,精准确定林分冠层顶点与

地面点位置。另外,由于通过冬季 GEDI 回波可精准区分冠层回波与林下地形回波,故在 r_h 参数提取过程中能够精准确定地面波峰点,即在基于 GEDI L2A 产品 r_h 参数估测森林冠层高度时,最佳估测结果 r_h 参数值应接近 $r_{h_{100}}$ 。本研究森林冠层高度估测精度最佳 r_h 参数值为 $r_{h_{96}}$,具体估测精度见表 6。

表 6 冬季 r_h 参数森林冠层高度估测精度
Tab. 6 Estimation accuracy of forest canopy with r_h parameters in winter

相对高度	R^2	RMSE/m
$r_{h_{90}}$	0. 604	3. 813
$r_{h_{91}}$	0. 614	3. 765
$r_{h_{92}}$	0. 621	3. 731
$r_{h_{93}}$	0. 626	3. 705
$r_{h_{94}}$	0. 631	3. 684
$r_{h_{95}}$	0. 633	3. 674
$r_{h_{96}}$	0. 633	3. 671
$r_{h_{97}}$	0. 631	3. 682
$r_{h_{98}}$	0. 626	3. 707
$r_{h_{99}}$	0. 619	3. 744
$r_{h_{100}}$	0. 616	3. 758

如表 5、6 所示,不同 r_h 参数条件下冬季森林冠高估测精度最优值(R^2 为 0. 633, RMSE 为 3. 671 m)高于夏季森林冠高估测精度最优值(R^2 为 0. 573, RMSE 为 3. 695 m)。分析其原因:相对于夏季茂密森林植被,冬季落叶林和阔叶林具有落叶特性,其对应林分冠层枝叶覆盖面积较夏季偏低,使得 GEDI 发射波激光脉冲可轻易穿透冬季林分冠层进而获取其对应林下地形信息,表现在回波波形上为冬季 GEDI 回波中林分冠层回波与林下地形回波较夏季更易区分,可精确识别林分冠层波峰点与地面波峰点,提高森林冠层高度估测精度。对比林晓娟^[34]利用 $r_{h_{95}}$ 参数在南宁市 4—10 月森林冠层高度最优估测精度(R^2 为 0. 21, RMSE 为 8. 44 m),验证了 GEDI 波形数据在冬季森林冠层高度精确估测方面的优越性。

2.2 地形坡度校正前后森林冠层高度

高坡度地形是导致 GEDI 回波波形展宽以及林分冠层回波与林下地形回波波形重叠的关键因素,且 GEDI 波形展宽在一定程度加重了林分冠层回波与林下地形回波波形重叠度,使得在基于 GEDI 波形数据对高坡度森林冠层高度估测时易受地形坡度影响从而降低其估测精度。基于此,本研究结合 2.1 节不同季节森林冠层高度实验结果,利用 r_h 字段最佳百分比数据 $r_{h_{96}}$ 对地形坡度校正前、后森林冠层高度进行估测。地形坡度校正前、后冬季森林冠层高度估测结果散点图如图 7 所示。

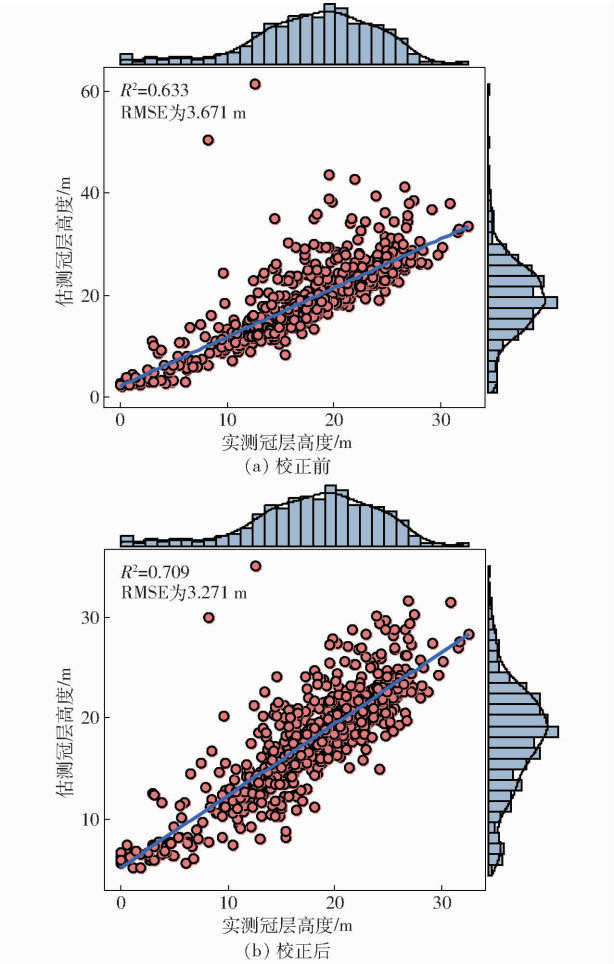


图 7 地形坡度校正前、后森林冠层高度估测结果
Fig. 7 Forest canopy height estimation results before and after topographic slope correction

由图 7 可知,基于 GEDI L2A 产品文件 r_h 字段 $r_{h_{96}}$ 参数对森林冠层高度估测时在引入地形坡度 DTM 参数后森林冠层高度估测 R^2 从 0. 633 提升到 0. 709, RMSE 从 3. 671 m 降低到 3. 271 m。分析其原因:通过对本文研究区样地数据调查发现,区域内冬季(12 月)GEDI 光斑点数量共 682 个,其中地形坡度超过 20° 的光斑点数量为 194 个,地形坡度超过 30° 的光斑点数量为 52 个。高坡度地形使得 GEDI 回波波形在波形展宽的同时增大了林分冠层回波和林下地形回波的波形重叠度,导致在波形长度参数提取过程中难以准确识别林分冠层回波起始点和林下地形回波起始点,以致 GEDI L2A 产品文件 r_h 字段参数起点易出现在 GEDI 光斑实际地面点以上或以下,从而降低 GEDI 波形长度参数 r_h 提取精度,出现高坡度地形森林冠层高度估测精度偏低问题。在森林冠层高度估测模型中引入地形坡度因子,能够在一定程度上削弱因地形坡度引起的 GEDI 林地回波波形难以准确识别从而降低 GEDI 波形长度参数 r_h 提取精度问题,进而提高森林冠层高度估测精度。

为探究不同地形坡度对 GEDI 波形数据森林冠层高度估测精度的影响,并分析地形坡度校正前后森林冠层高度估测精度的变化趋势。基于 GEDI 波形数据以 5°为间隔,分别对 0°~5°、0°~10°、0°~15°、0°~20°、0°~25°、0°~30°以及≥0°7 组地形坡度条件下森林冠层高度进行估测,地形坡度校正前、后冬季森林冠层高度估测结果分别如表 7、8 所示。

表 7 地形坡度校正前森林冠层高度估测结果
Tab.7 Estimation results of forest canopy height before topographic slope correction

坡度/(°)	R^2	RMSE/m	光斑数量
0~5	0.909	1.637	24
0~10	0.879	2.362	155
0~15	0.856	2.361	343
0~20	0.854	2.324	488
0~25	0.821	2.598	599
0~30	0.807	2.679	630
≥0	0.633	3.671	682

表 8 地形坡度校正后森林冠层高度估测结果
Tab.8 Estimation results of forest canopy height after topographic slope correction

坡度/(°)	R^2	RMSE/m	光斑数量
0~5	0.915	1.576	24
0~10	0.879	2.361	155
0~15	0.857	2.358	343
0~20	0.855	2.321	488
0~25	0.822	2.593	599
0~30	0.808	2.672	630
>0	0.709	3.271	682

如表 7、8 所示,地形坡度校正前后森林冠层高度估测精度(R^2 、RMSE)均随地形坡度增大而降低;而且,高坡度地形森林冠层高度估测模型经地形坡度校正后森林冠层高度估测精度明显优于校正前。分析其原因:①非平坦地形条件下地形坡度将导致 GEDI 回波波形出现展宽现象,从而增大林分冠层回波与林下地形回波重叠度,降低波形长度参数 r_h 对 GEDI 光斑点内地形信息的提取精度,使得森林冠层高度估测精度偏低,故存在森林冠层高度估测精度随地形坡度增大而降低情况。②森林冠层高度估测模型在引入地形坡度 DTM 数据后,DTM 数据能够弥补高坡度地形条件下 GEDI 高展宽、高重叠回波

波形中的林分冠层回波与林下地形回波难以精确识别,从而导致林下地形信息无法精确提取问题,降低波形展宽及波形重叠对森林冠层高度估测精度影响,从而提高森林冠层高度估测精度。本研究地形坡度校正后森林冠层高度整体估测精度(R^2 为 0.709, RMSE 为 3.271 m)相对于孙悦^[35]利用 $r_{h,99}$ 参数对 2019 年 4 月—2021 年 7 月期间安徽省森林冠层高度整体估测精度(R^2 为 0.598, RMSE 为 5.736 m)具有一定优势,验证了 GEDI 波形数据在亚热带冬季森林冠层高度精确估测方面的优越性。

3 结论

(1)针对夏季密林区星载 LiDAR 发射波激光脉冲难以穿透林分冠层到达林下地形进而无法高精度获取森林垂直结构信息问题,结合研究区阔叶林、落叶林冬季落叶特性,通过 GEDI L2A 产品文件 r_h 字段参数分别对夏季、冬季森林冠层高度进行估测,获得夏季、冬季森林冠层高度估测精度 R^2 分别为 0.573 和 0.633, RMSE 分别为 3.695 m 和 3.671 m,证明 GEDI 波形数据在冬季估测森林冠层高度的适用性及高精度性。

(2)利用 NEON 机载 LiDAR 提供的数字模型 DTM 数据作为地形坡度因子修正森林冠层高度估测模型,对比分析地形坡度校正前后森林冠层高度估测精度。获得冬季森林冠层高度地形坡度校正前、后估测精度 R^2 分别为 0.633 和 0.709, RMSE 分别为 3.671 m 和 3.271 m。证明 DTM 数据能够削弱因地形坡度引起的 GEDI 回波波形展宽以及林分冠层回波与林下地形回波重叠的影响。

(3)为探究地形坡度对 GEDI 波形数据森林冠层高度估测精度影响,分析地形坡度校正前、后森林冠层高度估测精度变化趋势。以 5°为间隔,分别对 0°~5°、0°~10°、0°~15°、0°~20°、0°~25°、0°~30°以及≥0°共 7 组地形坡度条件下森林冠层高度进行估测,发现地形坡度校正前、后森林冠层高度估测精度(R^2 、RMSE)均随地形坡度增大而降低,高坡度地形森林冠层高度估测模型经地形坡度校正后能明显提高森林冠层高度估测精度,地形坡度为 0°~5°时校正前后森林冠层高度估测精度相近。研究结果可为后续星载 LiDAR 波形数据森林冠层高度估测研究提供数据基础。

参 考 文 献

[1] CHEN Haibo. China releases 30-meter-resolution global forest cover map[EB/OL]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201911/t20191121_2482563.html.
[2] TZAMTZIS I, GANATSAS P. Land use, land-use change and their effect on greenhouse gas emissions and removals from Greek

- forests[J]. International Journal of Global Warming, 2020, 22(1): 111 – 131.
- [3] OUYANG S, GOU M, LEI P, et al. Plant functional trait diversity and structural diversity co-underpin ecosystem multifunctionality in subtropical forests[J]. Forest Ecosystems, 2023, 10(2): 153 – 161.
- [4] YUAN Xiaochun, CUI Juyan, WU Lianzuan, et al. Relationship between soil bacterial communities and dissolved organic matter in a subtropical *Pinus taiwanensis* forest after short-term nitrogen addition[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 512(1): 120165.
- [5] JHA, S, BAWA, K S. Population growth, human development, and deforestation in biodiversity hotspots[J]. Conservation Biology, 2006, 20(3): 906 – 912.
- [6] 王爱松.《联合国气候变化框架公约》第26届缔约方大会谈判说明[J]. 国际社会科学杂志(中文版), 2022, 39(2): 173 – 182.
- [7] 曹莉, 刘琰. 联合国框架下的国际碳交易协同与合作——从《京都议定书》到《巴黎协定》[J]. 中国金融, 2022(23): 79 – 81.
- [8] PANSEY A, ARUNACHALAM K, THADANI R, et al. Forest degradation impacts on carbon stocks, tree density and regeneration status in Banj oak forests of Central Himalaya[J]. Ecological Research, 2020, 35(1): 208 – 218.
- [9] JAMALUDDINSYAH J, KOTOWSKA M M, SULISTIJORINI S, et al. Tree height effects on vascular anatomy of upper-canopy twigs across a wide range of tropical rainforest species[J]. Journal of Tropical Ecology, 2022, 38(6): 416 – 425.
- [10] MUTWIRI F K, ODERA P A, KINYANJUI M J. Estimation of tree height and forest biomass using airborne LiDAR data: a case study of Londiani forest block in the Mau Complex, Kenya[J]. Open Journal of Forestry, 2017, 7(2): 255 – 269.
- [11] LANG N, SCHINDLEK, WEGNER J D. High carbon stock mapping at large scale with optical satellite imagery and spaceborne LiDAR[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2107.07431>.
- [12] LOH H Y, JAMES D, IOKI K, et al. Aboveground biomass changes in tropical montane forest of Northern Borneo estimated using spaceborne and airborne digital elevation data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 1 – 16.
- [13] FAN Guangpeng, DONG Yanqi, CHEN Danyu, et al. New method for forest resource data collection based on smartphone fusion with multiple sensors[J]. Mobile Information Systems, 2020, 2020(4): 1 – 11.
- [14] HAKKENBERG C R, TANG H, BURMS P, et al. Canopy structure from space using GEDI LiDAR[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2023, 21(1): 55 – 56.
- [15] 黄佳鹏, 李国元, 刘诏. 星载激光雷达估测森林结构参数研究现状分析与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 18 – 33.
- [15] HUANG Jiapeng, LI Guoyuan, LIU Zhao. Current status and development trend in estimating forest structural parameters with spaceborne LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 18 – 33. (in Chinese)
- [16] TORRESANI M, ROCCHINI D, ALBERTI A, et al. LiDAR GEDI derived tree canopy height heterogeneity reveals patterns of biodiversity in forest ecosystems[J]. Ecological Informatics, 2023, 76(5): 102082.
- [17] TANG Hao, DUBAYAH R, BROLLY M, et al. Large-scale retrieval of leaf area index and vertical foliage profile from the spaceborne waveform LiDAR (GLAS/ICESat)[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 8 – 18.
- [18] 邱赛, 邢艳秋, 田静, 等. 基于 ICESat – GLAS 波形数据估测森林郁闭度[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 99 – 106.
- [18] QIU Sai, XING Yanqiu, TIAN Jing, et al. Estimation of forest canopy density based on ICESat – GLAS waveform data[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition), 2016, 40(5): 99 – 106. (in Chinese)
- [19] NI-MEISTER W, ROJAS A, LEE S. Direct use of large-footprint LiDAR waveforms to estimate aboveground biomass[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 280: 113147.
- [20] WANG Cheng, TANG Fuxin, LI Liwei, et al. Wavelet analysis for ICESat/GLAS waveform decomposition and its application in average tree height estimation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 10(1): 115 – 119.
- [21] GUERRA-HERNANDEZ J, PASCUAL A. Using GEDI LiDAR data and airborne laser scanning to assess height growth dynamics in fast-growing species: a showcase in Spain[J]. Forest Ecosystems, 2021, 8(1): 182 – 198.
- [22] SUN Guoqing, 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.
- [23] LEFSKY M A, HARDING D J, KELLER M, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(22): 1 – 4.
- [24] 邱赛. ICESat – GLAS 波形与 HJ – 1A 高光谱影像联合反演森林地上生物量的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [24] QIU Sai. The research of regional forest above ground biomass inversion combining ICESat – GLAS waveform and HJ – 1A hyperspectral imageries[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [25] 王蕊, 邢艳秋, 尤号田. 基于 ICESat – GLAS 的坡地最大树高估测模型比较研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 154 – 160.
- [25] WANG Rui, XING Yanqiu, YOU Haotian. Comparison of ICESat – GLAS-based estimation models of maximum tree height under slope terrain condition[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 154 – 160. (in Chinese)
- [26] TIAN Jinyan, WANG Le, LI Xiaojuan, et al. Differentiating tree and shrub LAI in a mixed forest with ICESat/GLAS spaceborne LiDAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(1): 87 – 94.
- [27] LANG N, KALISCHEK N, ARMSTON J, et al. Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LiDAR

waveforms with deep ensembles[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 268: 112760.

[28] LIANG Mengyu, DUNCANSON L, SILVA J A, et al. Quantifying aboveground biomass dynamics from charcoal degradation in Mozambique using GEDI LiDAR and Landsat[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 284:113367.

[29] 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 the maximum canopy height and biomass inversion of the data of different GEDI algorithm groups[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022,42(10):72–82. (in Chinese)

[30] RISHMAWI K, HUANG C, ZHAN X. Monitoring key forest structure attributes across the conterminous united states by integrating GEDI LiDAR measurements and VIIRS data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3):442.

[31] KUMAR S, GOVIL H, SRIVASTAVA P K, et al. Spaceborne multifrequency PolInSAR-based inversion modelling for forest height retrieval[J]. Remote Sensing, 2020, 12(24):1–27.

[32] CAN V, GOKBERK N O, SAYGIN A. Retrieval of forest height information using spaceborne LiDAR data: a comparison of GEDI and ICESat–2 missions for Crimean pine (*Pinus nigra*) stands[J]. Trees, 2023, 37(1):1–17.

[33] ADAM M, URBAZAEV M, SCHMULLIUS C. 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.

[34] 林晓娟. 基于 ICESat–2 和 GEDI 森林冠层高度和森林地上生物量遥感诊断[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2022.

LIN Xiaojuan. Remote sensing diagnosis of forest canopy height and forest aboveground biomass based on ICESat–2 and GEDI [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences (Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences), 2022. (in Chinese)

[35] 孙悦. 基于星载激光雷达数据的安徽省森林冠层高度反演研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2023.

SUN Yue. Study on inversion of forest canopy height in Anhui Province based on spaceborne LiDAR data[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 302 页)

[26] GONG R, WANG H, CHEN L, et al. Application of entropy production theory to hydro-turbine hydraulic analysis[J]. Science China—Technological Sciences, 2013, 56(7): 1636–1643.

[27] 李德友. 水泵水轮机驼峰区流动机理及瞬态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

LI Deyou. Investigation on flow mechanism and transient characteristics in hump region of a pump-turbine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

[28] 许哲,郑源,阚阚,等. 基于熵产理论的超低扬程双向卧式轴流泵装置飞逸特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 49–57.

XU Zhe, ZHENG Yuan, KAN Kan, et al. Runaway characteristics of bidirectional horizontal axial flow pump with super low head based on entropy production theory[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 49–57. (in Chinese)

[29] KOCK F, HERWIG H. Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2205–2215.

[30] MATHIEU J, SCOTT J. An introduction to turbulent flow[M]. New York: Cambridge University Press, 2000.