

GEDI 与 Tandem - X DEM 估测密林林下地形性能评价

黄佳鹏 夏婷婷 宇 洋

(辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000)

摘要: 针对密林情况下, GEDI 数据与现有的 Tandem - X DEM 数字地面模型估测林下地形精度没有进行整体评价问题, 拟以密林情况作为主要分析场景, 通过提取 GEDI L2A 数据产品对应光斑的经纬度、林下地形信息与数据质量筛选参数, 开展数据质量筛选, 用以估测基于 GEDI 数据的林下地形数据, 与 Tandem - X DEM 数据估测密林情况下研究区林下地形开展比较, 并进一步探究冠层高度、森林覆盖度与植被类型对估测精度的影响。GEDi 与 Tandem - X DEM 的 R^2 分别为 0.99 和 0.98, GEDI 估测林下地形结果的 RMSE、Average 与 STD 分别 6.49、-1.92、4.42 m, Tandem - X DEM 估测林下地形结果的 RMSE、Average 与 STD 分别为 18.15、14.63、7.35 m。GEDi 数据在混交林和稀疏草原情况下 RMSE 与 Average 分别变化 8.05 m 和 6.04 m, Tandem - X DEM 数据在常绿针叶林与农田/天然植被情况下, RMSE 与 Average 变化幅度为 21.63、26.43 m。实验结果表明, GEDI 与 Tandem - X DEM 数据与机载验证数据存在强相关性, 且 GEDI 相对 Tandem - X DEM 数据表现出更优的评价标准; 地表植被类型相对冠层高度和植被覆盖度会对两数据估测林下地形精度产生更大的影响。

关键词: 林下地形; 密林区域; 精度评估; GEDI; Tandem - X DEM

中图分类号: S757

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)09-0279-09

OSID:



Evaluation of Underforest Terrain Performance Estimation Using GEDI and Tandem - X DEM Data in Dense Forests

HUANG Jiapeng XIA Tingting YU Yang

(School of Geomatics, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin 123000, China)

Abstract: In the case of dense forests, the accuracy of estimating underforest terrain using GEDI data and existing Tandem - X DEM digital terrain models has not been comprehensively evaluated. Aiming to focus on the dense forest situation as the main research object and using airborne data as real validation data. By extracting the longitude and latitude of the corresponding LiDAR spot, underforest terrain information, and data quality screening parameters of the GEDI L2A data product, to estimate underforest terrain data based on GEDI data. Compared with Tandem - X DEM data to estimate the underforest terrain under dense forest conditions, and further explore the effects of canopy height, forest coverage, and vegetation type on estimation accuracy. The R^2 values of GEDI and Tandem - X DEM were 0.99 and 0.98, respectively. The RMSE, Average, and STD values of GEDI for estimating underforest terrain were 6.49 m, -1.92 m, and 4.42 m, respectively. The RMSE, Average, and STD values of Tandem - X DEM for estimating underforest terrain were 18.15 m, 14.63 m, and 7.35 m, respectively. In GEDI data, RMSE and Average were changed by 8.05 m and 6.04 m respectively in the case of mixed forest and sparse grassland, and in Tandem - X DEM data, RMSE and Average were changed by 21.63 m and 26.43 m respectively in the case of evergreen coniferous forest and farmland/natural vegetation. The experimental results indicated that there was a strong correlation between GEDI and Tandem - X DEM data and airborne validation data, and GEDI performed better evaluation criteria than Tandem - X DEM data. The surface vegetation types performed greater impact on the estimation of underforest terrain than canopy height and vegetation coverage.

Key words: underforest terrain; dense forest areas; accuracy evaluation; GEDI; Tandem - X DEM

收稿日期: 2023-06-09 修回日期: 2023-06-23

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金项目(2023-BS-202)、国家重点研发计划项目(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和应用研究, E-mail: huangjiapeng@lntu.edu.cn

0 引言

截至 2021 年我国森林总面积达 $3.46 \times 10^{10} \text{ hm}^2$, 森林覆盖率达 24.02%, 林下地形不仅是监测森林生态系统的基础数据, 也是构成全球范围数字地面模型的重要部分^[1]。但是现有数字地面模型在森林环境下表征的地面信息, 并不是真实的林下地形 (移除森林覆盖的数字地面模型) 位置^[2], 特别是在密林情况下数字地面模型精度可能存在更大偏差^[3-4]。传统的森林林下地形测量方法需耗费大量的人力、财力, 且效率较低。利用遥感技术对森林垂直分布进行定量估测, 可提高森林结构参数的估测精度, 并有效缩短监测周期^[5-6], 对于监测森林树高、了解森林生态系统功能和估算森林碳储量具有重要意义^[7]。

全球陆地生态调查系统 (Global ecosystem dynamics investigation, GEDI) 作为新一代的星载激光雷达载荷, 其科学任务包括表征全球森林生态系统结构和动态, 可以从根本上改进对地球碳循环和生物多样性的量化和理解, 其数据产品在量化林下地形方面表现出巨大潜力^[8-11]。GEDI 的光斑直径约为 25 m, 沿轨的光斑间距为 60 m, 相邻地面轨迹的间距为 600 m^[12-13]。鉴于星载激光雷达数据估测垂直森林结构参数方面的优势, 笔者前期研究中, 探究了美国 9 个研究区的星载激光雷达提取林下地形的精度, 决定系数 R^2 为 0.8, RMSE 为 3.02 m^[14]。VITEZSLAV 等^[15] 分析了星载激光雷达数据产品的林下地面高程数据在欧洲境内的精度, RMSE 为 1.73 ~ 3.22 m。故星载激光雷达数据可尝试作为评价数据, 用以探究现有数字高程模型数据的精度。其中, NAHED 等^[16] 利用星载激光雷达数据验证了 ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)、SRTM (Shuttle radar topography mission) DEM (V3) 和 TanDEM-X DEM (V1) 的精度, 其结果的 RMSE 分别为 10.74、12.35、9.62 m。LI 等^[17] 利用中国境内的星载激光雷达数据, 验证了 Copernicus、SRTM 与 AW3D30 的精度, 其结果的 RMSE 分别为 6.73、6.59、6.63 m。研究结果表明, 星载激光雷达能够获取较精确的林下地形信息, 且结果优于常见的 DEM 数据, 可为林下地形高精度估测提供基础数据。但是, 现有研究仅以机载数据验证星载激光雷达数据估测精度或利用星载激光雷达数据探究 TanDEM-X DEM 等 DEM 数据精度, 并未以真实数据作为评价标准, 探究 GEDI 数据与 TanDEM-X DEM 估测林下地形精度, 特别是密林^[18] 情况下的林下地形精度。

综上所述, 现有研究缺少密林情况下 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据估测林下地形性能评价, 尚不能全面衡量 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据产品估测林下地形的性能。

基于此, 本文以森林覆盖度大于 70% 作为密林的划分条件^[18], 利用机载 G-LiHT (Goddard's LiDAR hyperspectral thermal) 数据作为真实数据, 开展 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据估测林下地形性能评价研究。通过统计不同研究区的定量评价指标, 分析两数据在密林条件下, 林下地形估测结果, 并结合研究区的植被覆盖度、冠层高度、植被类型, 分析其对于两数据产品估测林下地形的影响。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区

为评价 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据产品估测密林情况下林下地形的性能, 选择美国不同森林覆盖区域作为研究区。选择研究区域为 G-LiHT 网站上公布的研究区主要覆盖物为植被的星载激光雷达数据。选择位于美国的 Idaho 州、Marine 州、New Hampshire 州、Orgeon 州、Puerto Rico 自治邦与 Washington 州等地区作为研究区。研究区 Idaho 州、Marine 州、New Hampshire 州、Orgeon 州、Puerto Rico 自治邦与 Washington 州的采样点最大冠层高度的平均值分别为 28.27、20.33、22.65、31.08、21.29、23.64 m, 各研究区的植被覆盖度分别为 92%、88%、76%、88%、73%、86%, 研究区林下地形范围为 [0.35 m, 1 043.87 m]。研究区示意图如图 1 所示。

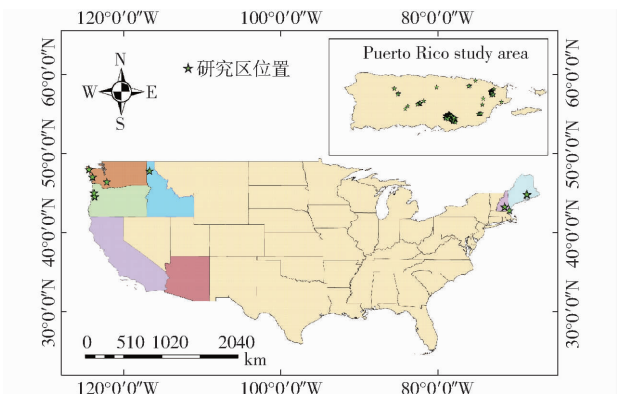


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of study area

1.2 研究数据

1.2.1 GEDI 数据

GEDI 搭载了全球首台用于高分辨率森林垂直结构测量的多波束线性体制激光测高仪, GEDI 数据覆盖范围是 51.6°N 至 51.6°S, 主要用于热带和温

带地区的森林垂直结构参数、地面高程等的精准测量^[8-10]。GEDI于2018年12月成功发射,被搭载到国际空间站上,其质量为519 kg,GEDI包含3个相同的近红外激光器,脉冲重复频率为242 Hz,能量10 mJ,向地面发射波长1 064 nm的脉冲激光。GEDI由3个激光器组成,其中2个是全功率激光器,通过改变激光束指向,各自产生2个光束。另外1个激光器是全覆盖激光器,被分成2个光束,然后共产生4个光束,最终3个激光器产生8个地面光束轨迹,分别为BEAM0000、BEAM0001、BEAM0010、BEAM0011、BEAM0101、BEAM0110、BEAM1000、BEAM1011^[19-20]。GEDI光斑分布形式如图2所示。

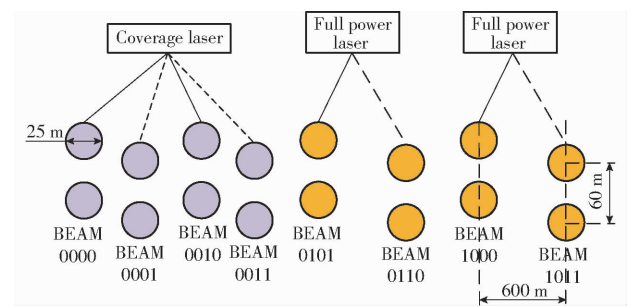


图2 GEDI光斑分布
Fig. 2 GEDI spot distribution

GEDI数据产品分为4级产品,第1级别为原始波形数据(L1A)和定位波形数据(L1B),第2级别为冠层高度和剖面指标(L2A和L2B),第3级别为网格冠层指标(L3),第4级别为网格生物量指标(L4)。为探究密林情况下GEDI数据产品林下地形估测精度,研究拟使用GEDI的L2A高程产品,L2A级数据产品的目的是为森林结构参数估测研究提供NASA官方波形解释数据,数据产品包括地面高程、冠层高度和相对高度指标等森林结构参数指标^[21]。

为探究密林情况下GEDI数据产品估测林下地形精度,研究拟提取参数包括:lon_lowestmode、lat_lowestmode、elev_lowestmode作为林下地面高程信息参数。由于GEDI星载激光雷达数据与机载激光雷达数据的高程基准面不同,需提取参数mean_sea_surface用于统一高程基准面。为优选GEDI数据质量,研究选择L2A数据产品中的质量评价参数包括:quality_flag、degrade_flag和sensitivity^[21]。

1.2.2 Tandem-X数据

Tandem-X是一项地球观测雷达任务,由2颗几乎相同的卫星组成的合成孔径雷达干涉仪(Interferometer synthetic aperture radar, InSAR)组成,它们以近距离编队飞行,可生成全球数字高程模

型(Digital elevation model, DEM)。这些数据目前由美国地质勘探局免费分发,可从美国地图无缝数据分发系统或美国地质勘探署FTP网站下载。TanDEM-X任务的主要目标是创建一幅覆盖地球陆地表面的精确3D地图^[2]。数据采集于2015年1月完成,全球DEM的制作于2016年9月完成。非森林覆盖地区的绝对高度误差约为1 m。数据产品覆盖了地球上 1.5×10^8 km²的陆地,TanDEM-X DEM是首个以统一精度和无间隙方式获取的全球全覆盖数字高程产品^[22]。

1.2.3 G-LiHT数据

研究拟以G-LiHT数据作为真实的验证数据开展GEDI与Tandem-X DEM数据的估测林下地形精度验证。G-LiHT数据为高分辨率机载激光雷达扫描数据,利用G-LiHT DTM(Digital terrain model)数据产品评估GEDI在估测林下地形方面的性能,利用G-LiHT冠层高度模型(Canopy height mode, CHM)数据产品开展森林冠层高度影响林下地形估测性能探究。数据产品从机载离散回波激光雷达中获得,并使用多传感器仪器G-LiHT进行收集。数据产品以TIFF格式发布,空间分辨率为1 m。对于测绘项目,DTM的高程精度通常优于0.5 m^[23-24]。研究拟利用G-LiHT的DTM数据开展林下地形精度评价工作,利用G-LiHT的CHM数据开展冠层高度对于林下地形影响因素探究。

G-LiHT数据产品包含森林环境下DTM数据,为量化星载激光雷达GEDI估测森林结构参数的精度,NASA官方开展了G-LiHT数据采集。截至2022年,G-LiHT已被用于收集美国国家航空航天局赞助的美国、波多黎各和墨西哥广泛生态区的766个研究区的数据。本文中使用的G-LiHT数据集包括Newburyport、Loudon、PR、AMIGArb_CFR_FIA、Penobscot和AMIGArb_G01。研究使用的G-LiHT数据可在<https://glihtdata.gsfc.nasa.gov/>下载。

1.2.4 森林覆盖度数据

为开展密林区域划分,并开展森林覆盖度对于林下地形影响因素探究,研究拟采用的冠层覆盖数据为MOD44B数据产品,该产品由MODIS数据产生。MOD44B冠层覆盖度产品是地表植被冠层覆盖的全球数据产品,由3个覆盖类别组成,分别是冠层覆盖百分比、非冠层覆盖百分比和裸露百分比。MOD44B产品旨在通过用一定比例的基本覆盖成分来表示每个像素中的土地覆盖,从而克服土地覆盖类别之间突然出现的差异。MOD44B产品提供了陆地表面覆盖的定量化描述,并参考3种地面覆盖成分对覆盖百分比进行了亚像素描述^[25]。研究中使

组为 $[0\text{ m}, 5\text{ m})$ 、 $[5\text{ m}, 10\text{ m})$ 、 $[10\text{ m}, 15\text{ m})$ 、 $[15\text{ m}, 20\text{ m})$ 、 $[20\text{ m}, \infty)$ ，分别进行林下地形估测精度对比，探究冠层高度对于 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据产品估测密林情况下林下地形性能的影响。

2.3.2 植被覆盖度

文献[9]指出，植被覆盖度与星载激光雷达估测林下地形误差存在相关性，将研究区森林地区植被覆盖度分组为： $[70\% \sim 75\%)$ 、 $[75\% \sim 80\%)$ 、 $[80\% \sim 85\%)$ 、 $[85\% \sim 90\%)$ 、 $[90\% \sim 100\%)$ ，分别进行林下地形精度对比，探究密林情况下植被覆盖度，对于 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据产品估测密林情况下林下地形性能的影响。

2.3.3 植被类型数据

文献[9,12]指出，不同森林类型数据与星载激

光雷达估测林下地形误差存在相关性，将研究区森林类型数据分组为：常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、封闭灌木林、开放灌木林、木本稀树草原、稀树草原，分别进行林下地形精度对比，探究密林情况下植被类型数据对于 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据产品估测密林情况下林下地形性能的影响。

3 结果与分析

为研究 GEDI 与 Tandem-X DEM 估测林下地形能力，在美国 6 个研究区开展林下地形估测研究。图 4 为研究区 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据剖面形式高程数据。表 1 为各研究区林下地形估测精度评价指标汇总。

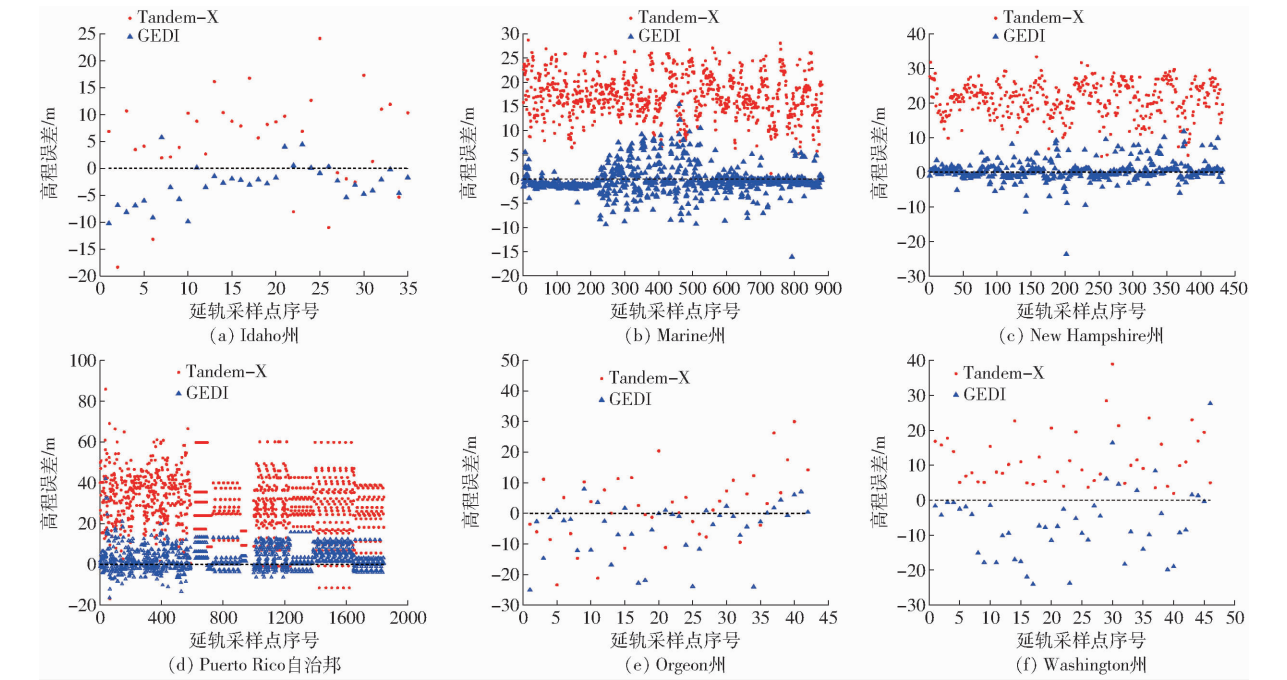


图 4 各研究区林下地形估测结果残差示意图
Fig.4 Residual diagram of underforest terrain estimation results

表 1 不同研究区林下地形估测结果定量评价指标汇总

研究区	GEDI-DEM				Tandem-X DEM			
	RMSE/m	R ²	Average/m	STD/m	RMSE/m	R ²	Average/m	STD/m
Idaho 州	4.69	0.99	-2.93	2.80	10.21	0.99	5.16	5.47
Marine 州	2.81	0.97	-0.34	2.10	17.76	0.93	17.20	4.44
New Hampshire 州	2.92	0.99	0.30	2.34	21.64	0.97	21.05	5.02
Orgeon 州	10.07	0.99	-4.99	7.52	13.19	0.99	3.26	8.84
Puerto Rico 自治邦	6.36	0.99	3.03	4.32	31.97	0.99	29.26	12.58
Washington 州	12.08	0.99	-6.60	7.42	14.11	0.99	11.83	7.76
平均值	6.49	0.99	-1.92	4.42	18.15	0.98	14.63	7.35

通过分析图 4 各研究区误差分布可知，Tandem-X DEM 误差多为正值，GEDI-DEM 的林下地形信息多为负值，研究采用的误差计算方式为利用机载

验证数据 DTM 与 Tandem-X DEM 做差，可知 Tandem-X DEM 数据多为低于机载验证数据，GEDI-DEM 多为高于机载验证数据。分析 Tandem-X

X DEM 数据产品制作特征可知,由于存在复杂的森林植被覆盖影响,导致 SAR 数据处理出现偏差,进而影响 Tandem - X DEM 数据产品估测林下地形的精度。GEDI 数据为星载激光雷达数据,由于其数据特性,使得其可以较为精准刻画森林在垂直方向上的信息,进而可以提供较为精准的林下地形信息。

以森林覆盖度作为分类评价标准可知,Marine 州、Puerto Rico 自治邦和 New Hampshire 州研究区的整体森林覆盖度分别达到 88%、73% 和 76%,大量的 GEDI - DEM 数据的误差均在“0”附近,并且远小于 Tandem - X DEM 的误差。而随着森林覆盖度数据进一步增大,Idaho、Orgeon 与 Washington 研究区的 GEDI - DEM 数据的误差变大,误差分布形式与 Tandem - X DEM 数据的误差情况类似,虽然本研究针对的情况为密林情况,但是研究结果与文献[9]描述结果类似,森林覆盖度对于数据估测林下地形存在较为明显的影响。

定量分析结果汇总如表 1 所示,在研究区域的林下地形估测评价试验中,GEDI - DEM 的 RMSE、 R^2 、Average、STD 的平均值分别为 6.49 m、0.99、-1.92 m 与 4.42 m。Tandem - X DEM 的 RMSE、 R^2 、Average、STD 的平均值分别为 18.15 m、0.98、14.63 m 与 7.35 m。虽然 GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 在 R^2 角度均与机载验证数据保持比较高的情况,但是进一步比较各个研究区的决定系数指标可知,GEDI - DEM 相对于 Tandem - X DEM 在各个研究区均表现出更优的 R^2 ,证明 GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据在估测林下地形方面与机载验证数据存在强相关性,而且 GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据整体变化趋势与机载验证数据类似。

比较 RMSE 可知,GEDI - DEM 的 RMSE 范围为 [2.81 m,12.08 m],Tandem - X DEM 的 RMSE 范围为 [10.21 m,31.97 m],文献[9]研究指出 GEDI 估测地面信息的 RMSE 在 [0.98 m,4.30 m] 附近,但是本研究的定量评价指标显示,密林情况下的 GEDI - DEM 的 RMSE 出现明显偏差,证明森林覆盖度等复杂森林信息将影响 GEDI - DEM 的估测精度。文献[2]研究指出 Tandem - X DEM 估测地面信息的绝对高程精度为 10 m,同样因为密林的特殊情况导致,Tandem - X DEM 估测林下地形信息表现出偏差更大的情况。比较两数据的 RMSE 可知,GEDI - DEM 估测林下地形的 RMSE 在各个研究区表现出更低的现象。

比较 Average 可知,Tandem - X DEM 数据在 New Hampshire 州与 Puerto Rico 自治邦甚至出现

Average 为 21.05 m 和 29.26 m 的情况,结合定性评价的图 4 可知,Tandem - X DEM 的误差区间分别为 [10 m,30 m] 与 [20 m,60 m],分析原因可能是由于密林情况,导致 SAR 数据处理的不确定性,使得其估测林下地形出现较大偏差。与此对应,GEDI - DEM 估测林下地形的 Average 在各研究区未出现比较明显的偏差情况。分析 STD 可知,GEDI - DEM 数据相对 Tandem - X DEM 数据在各个研究区均表现出更优的 STD。Average 与 STD 评价表明,虽然密林情况影响 GEDI - DEM 估测林下地形的精度,但是其定量评价指标均优于 Tandem - X DEM。

通过对定性与定量结果分析表明,由于密林情况影响,GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据在估测林下地形方面均表现出低于其他情况下林下地形的研究成果的情况。分析原因可知,本次研究主要选择的是密林情况,森林情况相对更为复杂,导致 SAR 数据和 GEDI 波形数据处理精度低。但是,通过进一步比较各定量评价指标,实验结果显示 GEDI - DEM 相对于 Tandem - X DEM 定量评价指标均表现更优。

4 讨论

4.1 冠层高度影响因素

统计不同冠层高度情况下,GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据估测林下地形的定量评价指标,如图 5 所示。

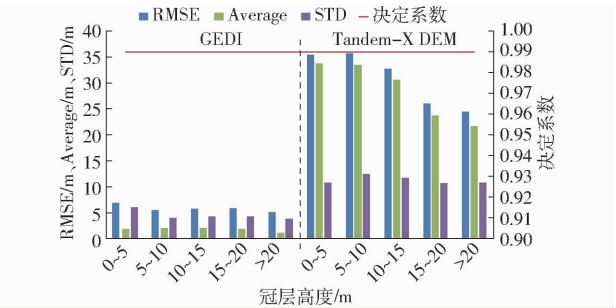


图 5 不同冠层高度情况 GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据估测林下地形的定量评价结果

Fig.5 Quantitative evaluation indicators for estimating underforest terrain using GEDI - DEM and Tandem - X DEM data under different canopy heights

分析图 5 中两数据定量评价指标可知,在研究区选择冠层高度范围内,GEDI 与 Tandem - X DEM 数据的决定系数表现类似,均在 0.99 范围内,定量数据结果表明,不同森林冠层高度情况下,GEDI、Tandem - X DEM 与机载验证数据之间存在强相关性。对比 RMSE、Average 与 STD 可知,GEDI 估测林下地形的定量评价指标均远低于 Tandem - X DEM 数据,定量评价指标显示 GEDI 估测林下地形相比

于 Tandem - X DEM 估测结果的 RMSE、Average 与 STD 平均降低 25.06、26.84、6.82 m,定量数据结果表明 GEDI 相对 Tandem - X DEM 表现出更优的定量评价指标。

仅对比森林冠层高度对于 GEDI 数据影响因素可知,GEDI 数据估测结果的 R^2 、RMSE、Average 与 STD,均能保证在一定范围内变化,未出现较大的变化趋势。其中,在研究选择的森林冠层高度内,GEDI 数据的 Average 变化范围为[0 m,2 m]。定量评价结果说明,由于 GEDI 激光数据波长为 1 064 nm,其具有不错的森林穿透能力,能够为估测森林林下地形提供科学数据。分析森林冠层高度对于 Tandem - X DEM 数据影响因素可知,Tandem - X DEM 数据估测结果的 R^2 能保证在 0.99,未出现较大的变化趋势。定量评价数据说明,Tandem - X DEM 数据估测林下地形的结果与机载 G - LiHT 验证数据存在强相关性。但是,RMSE、Average 与 STD 显示 Tandem - X DEM 数据出现较大的变化,其中,RMSE、Average 与 STD 变化幅度为 11.21、12.06、1.79 m,该结果与文献[10]实验结果类似,即不同的精度评价指标整体变化趋势为随冠层高度增加,定量评价误差逐步降低。定量评价数据说明,由于 Tandem - X DEM 数据构建数据产品特性,Tandem - X DEM 数据包含植被冠层高度导致出现较大评价指标偏差情况。研究进一步探究林下地形估测误差与森林冠层高度的相关性可知,GEDI 数据与 Tandem - X DEM 皮尔逊相关系数分别为 0.02 与 0.30,相关系数数据表明,森林覆盖度与 Tandem - X DEM 的误差表现出更明显的相关性。

4.2 植被覆盖度影响因素

统计不同植被覆盖度情况下,GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据估测林下地形的定量评价指标如图 6 所示。

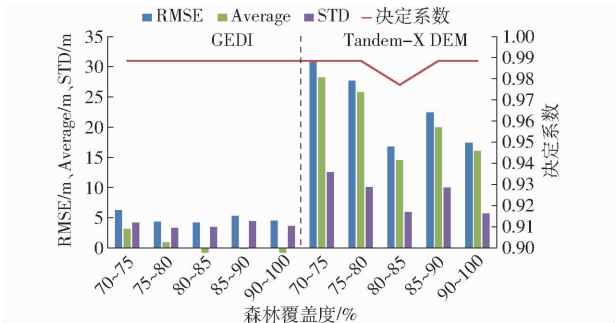


图 6 不同森林覆盖度情况 GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据估测林下地形的定量评价结果

Fig.6 Quantitative evaluation indicators for estimating underforest terrain using GEDI - DEM and Tandem - X DEM data under different forest cover conditions

分析图 6 中两数据定量评价指标可知,在研究区选择森林覆盖度范围内,GEDI 与 Tandem - X DEM 数据的决定系数表现类似,均在 0.99 范围内,定量数据结果表明,不同森林覆盖度情况下,GEDI 与 Tandem - X DEM 与机载验证数据之间存在强相关性。对比 RMSE、Average 与 STD 可知,GEDI 估测林下地形的定量评价指标均远低于 Tandem - X DEM 数据,定量评价指标显示 GEDI 估测林下地形的 RMSE、Average 与 STD 平均降低 18.14、20.41、5.04 m,定量数据结果表明 GEDI 相对 Tandem - X DEM 定量评价指标表现更优。

仅对比森林覆盖度对于 GEDI 数据影响因素可知,GEDI 数据估测结果的 R^2 、RMSE、Average 与 STD,均能保证在一定范围内变化,未出现较大的变化趋势。其中,GEDI 数据估测结果的 Average 在森林覆盖度为 75% ~ 100% 时变化范围为[- 1 m, 1 m]。定量评价结果说明,由于 GEDI 激光数据的特性,其波长为 1 064 nm,其具有不错的森林穿透能力,在密林区域甚至是森林覆盖度为 90% ~ 100% 定量评价指标均表现较优。分析森林覆盖度对于 Tandem - X DEM 数据影响因素可知,Tandem - X DEM 数据估测结果的决定系数能保证在一定范围内变化,未出现较大的变化趋势。定量评价数据说明,Tandem - X DEM 数据估测林下地形的结果与机载验证数据存在强相关性。但是,RMSE、Average 与 STD 显示 Tandem - X DEM 数据出现较大的变化,其中,RMSE、Average 与 STD 变化幅度为 14.19、13.65、6.63 m,该结果与文献[10]实验结果类似,即不同的精度评价指标整体变化趋势为随森林覆盖度增加,定量评价误差逐步降低,并且呈非线性变化。定量评价数据说明,由于 Tandem - X DEM 数据构建数据产品特性,Tandem - X DEM 数据包含植被信息导致出现较大评价指标偏差情况。研究进一步探究林下地形估测误差与森林覆盖度的相关性可知,GEDI 数据与 Tandem - X DEM 皮尔逊相关系数分别为 0.29 与 0.40,相关系数数据表明,森林覆盖度与 Tandem - X DEM 的误差表现出更明显的相关性。

4.3 植被类型影响因素

统计不同植被类型数据情况下,GEDI - DEM 与 Tandem - X DEM 数据估测林下地形的定量评价指标如图 7 所示。

分析图 7 中两数据定量评价指标可知,在研究区选择植被类型内,GEDI 与 Tandem - X DEM 数据的决定系数表现类似,均在 0.95 以上,定量数据结果表明,不同地表植被类型覆盖情况下,GEDI 与

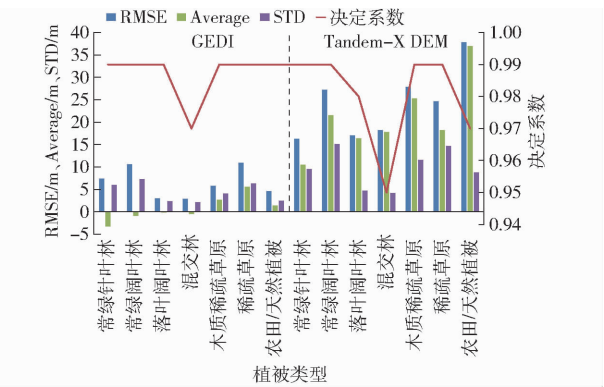


图 7 不同植被类型情况 GEDI-DEM 与 Tandem-X DEM 数据估测林下地形的定量评价结果

Fig. 7 Quantitative evaluation indicators for estimating underforest terrain using GEDI-DEM and Tandem-X DEM data under different vegetation types

Tandem-X DEM 与机载验证数据之间存在强相关性。对比 RMSE、Average 与 STD 可知,GEDI 估测林下地形的定量评价指标均远低于 Tandem-X DEM 数据,定量评价指标显示 GEDI 估测林下地形的 RMSE、Average 与 STD 平均降低 17.72、20.20、5.43 m,定量数据结果表明,GEDI 相对 Tandem-X DEM 定量评价指标表现更优。

仅对比地表植被类型对于 GEDI 数据影响因素可知,GEDI 数据估测结果的 R^2 、RMSE、Average 与 STD,混交林情况下,GEDI 定量评价指标表现较好,其中 RMSE、 R^2 、Average 与 STD 分别为 2.84 m、0.97、-0.48 m、2.13 m。稀疏草原情况下,GEDI 定量评价指标表现较差,其中 RMSE、 R^2 、Average 与 STD 分别为 10.89 m、0.99、5.56 m、6.25 m,2 种植被类型情况下,RMSE 和 Average 分别变化 8.05 m 和 6.04 m。分析 IGBP 分类标准可知,混交林的分类标准为针叶、阔叶在 40%~60% 之间,森林冠层高度大于 2 m,植被覆盖度大于 60%。稀疏草原为具有草本和其它林下系统的土地,树木覆盖度 10%~

30%,树冠高大于 2 m。产生不同地表植被类型精度不同的原因,可能是由于研究选择的参数导致的,GEDI 官方算法说明文档表示,共有 6 种不同参数的波形参数提取算法,但是全球范围的最优参数仅记录在 elev_lowestmode 参数中,即以相同算法参数完成全球范围林下地形估测,这将导致算法可能仅适用于部分地表植被类型,在其余地表植被类型下表现不佳。

分析地表植被类型对于 Tandem-X DEM 数据影响因素可知,Tandem-X DEM 数据估测结果的决定系数能保证在 0.95 以上,未出现较大变化趋势。定量评价数据说明,Tandem-X DEM 数据估测林下地形的结果与机载验证数据存在强相关性。但是 RMSE 与 Average 显示 Tandem-X DEM 数据出现较大变化,其中,常绿针叶林与农田/天然植被存在较大差异,RMSE 与 Average 变化幅度为 21.63、26.43 m,农田/天然植被情况下林下地形估测精度表现最差。定量评价数据说明,由于 Tandem-X DEM 数据构建数据产品特性,Tandem-X DEM 数据包含地表植被信息导致出现较大评价指标偏差情况。整体分析密林情况下,冠层高度、植被覆盖度和植被类型数据影响因素对于估测林下地形精度可知,植被类型数据导致定量评价指标出现变化相对另外两种数据更大。

5 结论

(1)GEDI 与 Tandem-X DEM 数据与机载验证数据存在强相关性,其中 GEDI 与 Tandem-X DEM 的 R^2 分别为 0.99 和 0.98 ,GEDI 相对 Tandem-X DEM 数据评价标准表现更优,其中,RMSE、Average 与 STD 分别为 6.49、-1.92、4.42 m。

(2)地表植被类型相对冠层高度和植被覆盖度,会对 GEDI 与 Tandem-X DEM 数据估测林下地形性能产生更大的影响。

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] 唐新明,李世金,李涛,等. 全球数字高程产品概述[J]. 遥感学报,2021,25(1):167-181.

TANG Xinming, LI Shijin, LI Tao, et al. Overview of global digital elevation products[J]. Journal of Remote Sensing,2021, 25(1):167-181. (in Chinese)

[3] SU Y, GUO Q. A practical method for SRTM DEM correction over vegetated mountain areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 87: 216-228.

[4] SHARIFI A, AMINI J. Forest biomass estimation using synthetic aperture radar polarimetric features[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1): 695.

[5] ZHAO X, SU Y, HU T, et al. A global corrected SRTM dem product for vegetated areas[J]. Remote Sensing Letters, 2018, 9(4):393-402.

[6] WANG H, FU H, ZHU J, et al. Estimation of subcanopy topography based on single-baseline Tandem-X InSAR data[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95: 1-19.

[7] 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.
- [8] ADAM M, URBAZAEV M, DUBOIS C, 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.
- [9] LIU A B, CHENG X, CHEN Z Q. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264: 112571.
- [10] LIU X Q, SU Y J, HU T Y, et al. Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 269:112844.
- [11] MA X, ZHENG G, CHI X, et al. Mapping fine-scale building heights in urban agglomeration with spaceborne[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 285: 113392.
- [12] RAJAB P M, BAGHDADI N, FAYAD I. Comparison of GEDI LiDAR data capability for forest canopy height estimation over broadleaf and needleleaf forests[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(6): 1522.
- [13] ZHOU X C, HAO Y, DI L, 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.
- [14] 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. Inversion of forest canopy height based on ICESat-2/ATLAS photon counting LiDAR data[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] NAHED O, SHAO Z, MA Y, et al. The ATL08 as a height reference for the global digital elevation models[J/OL]. *Geospatial Information Science*, 2022: 2087108. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2087108>.
- [17] LI H, ZHAO J, YAN B, et al. Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 151: 1149-1168.
- [18] 亢新刚. 森林经理学[M]. 北京:中国林业出版社, 2014.
- [19] QI W, LEE S K, HANCOCK S, et al. Improved forest height estimation by fusion of simulated GEDI LiDAR data and TanDEM-X InSAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 621-634.
- [20] ATMANI F, BOOKHAGEN B, SMITH T, et al. Measuring vegetation heights and their seasonal changes in the western Namibian Savanna using spaceborne LiDARs[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12):2928.
- [21] RALPH D, BRYAN B, SCOTT G, et al. Global ecosystem dynamics investigation (GEDI) Level 02 user guide[R]. 2021.
- [22] WESSEL B. TanDEM-X ground segment-DEM products specification document[S]. Earth Observation Center, 2013.
- [23] COOK B D, CORP L A, NELSON R F, et al. NASA goddard's LiDAR, hyperspectral and thermal (G-LiHT) airborne imager[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5: 4045-4066.
- [24] PAYNTER I, SCHAAF C, BOWEN J L, et al. Characterizing a New England Saltmarsh with NASA G-LiHT airborne LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 509.
- [25] DIMICELI C, CARROLL M, SOHLBERG R, et al. MOD44B MODIS/Terra vegetation continuous fields yearly L3 global 250 m sin grid V006[DB]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2023-04-22.
- [26] FRIEDL M, SULLA-MENASHE D. MODIS/Terra + aqua land cover type yearly L3 global 500 m sin grid V061[DB]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2023-01-05.