

基于多因子的城市区域 ICESat-2 测高数据精度评估分析

张雨薇, 王涛, 钟淑娴, 李晓玉

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048;
2. 首都师范大学 地面沉降机理与防控教育部重点实验室, 北京 100048

摘要: ICESat-2 星载激光雷达测高数据具有高精度、高时效性和低成本等优势, 可为城市三维模型构建提供数据基础, 然而, 该数据在城市区域仍缺乏系统性精度评估。鉴于此, 本文首先基于 ICESat-2 的 ATL03 和 ATL08 产品构建了研究区结构完整的城市星载测高数据集, 并依据多项参数进行高程异常值剔除和质量筛选, 然后利用研究区内局部区域机载激光点云对星载测高数据在水平和垂直方向上进行了偏移校正, 进而在研究区内其他区域对校正后的星载测高数据进行了精度评估, 最后围绕城市地类、强弱波束、采集时间、季节、地形坡度与植被覆盖度等多因子开展了误差特征分析。结果表明研究区内 ICESat-2 原始测高数据存在轻微低估 (ME 为 -0.10 m), MAE 为 0.67 m, RMSE 为 1.57 m, LE90 为 1.46 m, 其中, 建筑用地与其他用地类数据精度较低, 而交通运输、建筑附属及农林用地类数据精度较高, 在偏移校正处理后, 星载测高数据的系统性偏差与长尾误差被有效削弱, 总体数据精度明显提升 (MAE 为 0.48 m, RMSE 为 1.11 m), 弱波束数据与日间采集数据精度提升幅度较显著, 春冬两季、低坡平坦地形及高覆盖植被区的数据精度更高。本研究发现利用局部高精度机载激光数据校正 ICESat-2 测高数据, 可提高后者在相邻区域的精度水平, 改善 ICESat-2 日间获取数据和弱波束数据的可用性, 增加高质量光子的数量。本研究可为城市三维建模与多源数据融合提供参考。

关键词: ICESat-2, 星载激光雷达测高, 三维空间数据, 偏移校正, 城市, 精度评估, 多因子

中图分类号: P237/P228.3/TN958.98/P2

引用格式: 张雨薇, 王涛, 钟淑娴, 李晓玉. 2026. 基于多因子的城市区域 ICESat-2 测高数据精度评估分析. 遥感学报, 30(6): 1664-1676

Zhang Y W, Wang T, Zhong S X and Li X Y. 2026. Accuracy assessment and analysis of ICESat-2 Altimetry Data in urban areas based on multiple factors. National Remote Sensing Bulletin, 30(6): 1664-1676 [DOI: 10.11834/jrs.20265378]

1 引言

三维空间信息是开展资源规划、交通导航、生态监测及灾害评估等领域工作的基础数据资源, 全球人口与经济活动在城市区域高度集中, 其数字化、智能化建设对高精度、高时效、广覆盖的三维空间数据需求强烈, 高精度三维空间数据更新与维护有助于城市形态变化监测, 进而服务于城市空间环境的准确评估和资源分配。

美国宇航局于 2018 年发射的冰、云和陆地高程卫星 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2,

ICESat-2) 搭载了光子计数激光测高仪 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System), ATLAS 以 10 kHz 的频率向地面发射波长为 532 nm 的激光脉冲, 在地面形成沿轨方向分布的 3 组平行光束, 其中每组包含一强一弱两条独立光束, 组间跨轨距约 3.3 km、组内间距约 90 m。相邻脉冲在地面的沿轨间距约为 0.7 m, 单个脉冲释放数万亿个光子, 在地表对应的能量分布范围直径约为 17 m, ATLAS 探测到的单个脉冲有效返回光子数量为 10 个左右, 这些光子可能来自不同地物的反射 (Brunt 等, 2019)。ICESat-2 卫星数据分为 Level 0、Level 1、

收稿日期: 2025-09-12; 预印本: 2026-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42471464)

第一作者简介: 张雨薇, 研究方向为城市三维空间分析。E-mail: 2230902133@cnu.edu.cn

通信作者简介: 王涛, 研究方向为智慧城市与信息模拟。E-mail: wangt@cnu.edu.cn

Level 2、Level 3A/B这4个级别,有冰盖高度、洋面高度、植被高度等数据产品类型(朱笑笑等,2020),其核心任务是通过ATLAS测量冰盖、冰川、森林及海洋等地表要素的高程动态变化,目前在冰盖和海冰观测(Liu等,2025)、陆地生态反演(孟鸽等,2024)、积雪观测(李旭冰等,2022)及海洋水文研究(Buzzanga等,2021;李国元和唐新明,2022)等方面研究中得到广泛应用,部分研究涉及地形地貌(胡华参等,2025)及大气科学(Kuang等,2025)等领域。

ICESat-2的核心任务并非针对城市环境,没有提供关于城市区域相关的数据产品。近年来,越来越多的研究开始关注ICESat-2全球地理定位光子产品ATL03和土地植被高度产品ATL08的城市三维建模应用方法。Wang和Liu(2022)融合星载激光与多源遥感数据进行了城市环境下的森林树高反演;Zhao等(2023)、Wu等(2023)基于单张高分辨率遥感影像上提取的建筑物及其阴影长度,利用ICESat-2 ATL03产品中高置信度光子点数据,构建了建筑高度反演模型,在不同类型城市区域开展了试验,多个高度误差评价指标取得了较好结果;赵一(2023)利用ICESat-2及其他数据,设计实现了基于空间插值知识约束的生成对抗网络等方法,开展了城市大区域10 m分辨率的地形建模研究,在纽约市、赫尔辛基市、上海市等地取得了较好结果;Huang等(2024)设计了自适应高程缓冲区的噪声滤波、单光子空间分布识别和空间差分方法对ICESat-2/ATL03的建筑和地面光子点进行分割,在地形平缓和起伏较大区域分别实现了亚米级平均精度;Tang等(2025)利用ICESat-2/ATL03产品,实现了基于线性拟合和布料模拟法的建筑物高度采样方法,结合哨兵数据构建了建筑物高度估计模型,在深圳和纽约城区进行了较粗分辨率的建筑高度制图;Du等(2025)利用ICESat-2、GEDI星载激光测高数据和多源遥感影像生成地表覆盖类型数据,提出了一种半监督的基于邻域卷积神经网络的学习方法,对大尺度建筑物进行高度估计,其实验精度相对于已有建筑高度数据集有了明显提升。为了保证基于ICESat-2数据的三维建模精度,对其基础数据产品测高精度进行评估并提高非常重要(Brunt等,2019;李国元和唐新明,2022;赵一,2023)。Zhao等(2022)利用机载激光点云,对ICESat-2

的ATL03/08数据在纽约市高层密集建筑、非高层密集建筑以及森林区域等进行了精度评估,结果显示建筑区域均方根误差和绝对误差为2 m左右,其中强波束的精度略好于弱波束;Lian等(2022)利用ICESat-2 ATL03点云形态和邻域信息对地面与建筑光子进行了分类,实现了城市区域高精度控制点的提取;Li等(2023)根据ICESat-2 ATL08的沿轨剖面起伏构建直方图轮廓线,模拟地表水泵调节水流来校正提高城市区域地形高程精度。然而,ICESat-2基本数据产品的精度既受传感器平台、获取时间及强弱波束等自身因素影响,也受研究区地形特征和植被覆盖等地面环境制约,对其数据精度及影响因素进行全面分析,有助于高精度控制点选取和地表要素三维建模等工作的有效开展。

鉴于此,本文围绕ICESat-2的ATL03与ATL08数据产品在城市区域测高应用中的精度表现及其影响因素,基于星载激光点多项参数进行异常值剔除和质量筛选,结合局部机载LiDAR数据开展星载激光点水平及垂直地理定位偏移校正,并在相邻区域对校正结果进行精度评估,同时验证偏移校正的跨区域可迁移性,最后,从土地利用类型、强弱波束、采集时间、季节、坡度及植被覆盖度等多因子分析星载激光测高数据的误差分布特征,以期在城市精细化应用与多源数据融合提供参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

房山区是北京市兼具生态保护、科技金融与国际旅游功能的重要新城之一,研究区位于北京市房山区东北部,经纬度范围为 $116^{\circ}07'E-116^{\circ}11'E$ 、 $39^{\circ}41'N-39^{\circ}45'N$,总面积约为25.55 km²,涵盖了房山区的政治、文化、商贸中心。区域地势自西北向东南倾斜,海拔为12.74—59.04 m,土地利用类型包括建筑用地、道路、耕地、草地、林地及未利用地等。为适应复杂城市环境下的精度评估需求,将研究区自北向南划分为研究区1与研究区2。其中,研究区2用于星载测高数据的地理定位偏移校正,而建筑群体覆盖较广的研究区1作为待校正与数据精度评估区域(图1)。

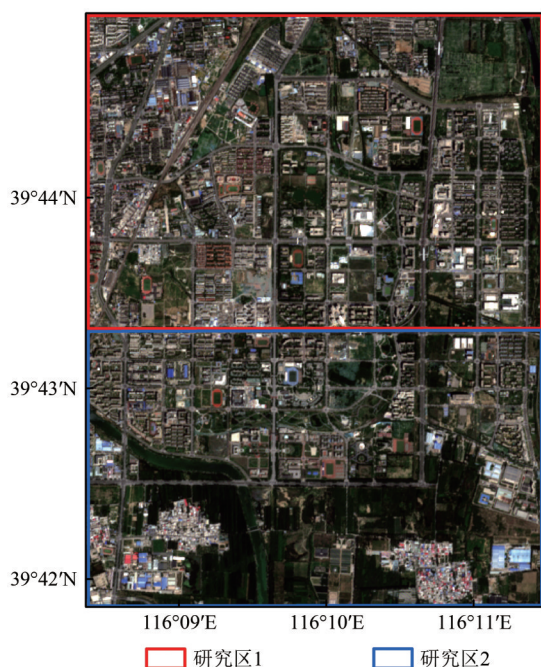


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2.2 数据来源

本研究采用星载激光测高卫星 ICESat-2 的 ATL03 与 ATL08 产品, 数据均获取自美国国家冰雪数据中心 (<https://nsidc.org/data/icesat-2/> [2025-09-12]), 时间范围覆盖2019年—2024年, 共选取了同时覆盖研究区1和研究区2的ATL03及ATL08各26条波束数据, 并投影至WGS_1984_UTM_Zone_50N 坐标系。ATL03 包含光子接收时间 (Δt)、经纬度 (lon_{ph} 、 lat_{ph})、椭球高 (h_{ph}) 和航天器飞行方向 (sc_orient) 等基础空间信息及光子质量标志 ($quality_{ph}$)、信号置信度 ($signal_conf_{ph}$) 等属性。ATL03 数据组织分为两个部分: 一部分按获取时间顺序记录每个光子的经纬度、高度及质量属性, 另一部分沿轨以 20 m 步长划分光子组, 记录组号 ($segment_id$)、起始光子序号 (ph_index_beg) 及组内光子数量 ($segment_ph_cnt$)。ATL08 是基于 ATL03 生成的, 沿轨分组为 100 m, 包含地形 (dem_h 、 h_te_interp)、植被、光子分类 ($classed_pc_flag$)、云量标志 ($cloud_flag_atm$)、地形坡度 ($terrain_slope$)、统计单元地形光子数 ($n_te_photons$)、统计单元光子数 (n_seg_ph)、夜间采集标志 ($night_flag$) 等属性 (赵一, 2023), 该数据组织分为单光子和统计单元两个部分, 前者采用 ATL03 的分组索引结构,

标记组号 ($ph_segment_id$)、组内相对序号 ($classed_pc_index$) 及光子分类, 后者沿轨以 100 m 步长划分区段, 保存每个区段的质量属性及起止组号 ($segment_id_beg$ 、 $segment_id_end$)。

用于偏移校正精度提升与评估的参考高程数据为2015年1月获取的机载激光雷达 LiDAR (Light Detection And Ranging) 点云, 叠加 ICESat-2 数据如图2所示, 该数据以WGS84椭球面为高程基准, 平面坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_50N, 研究区共获取激光点约4.11亿个, 平均点云密度达16.09点/m²。原始点云经去噪、滤波等预处理后, 分为地面点云与非地面点云。研究区的地类矢量数据主要来源于OpenStreetMap, 结合机载激光雷达点云数据提取了建筑平面轮廓数据。依据GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》, 对研究区内的原始城市地类矢量数据进行了无效要素剔除、缺失区域补充及地类归并处理, 最终形成如表1所示的地类分类体系。

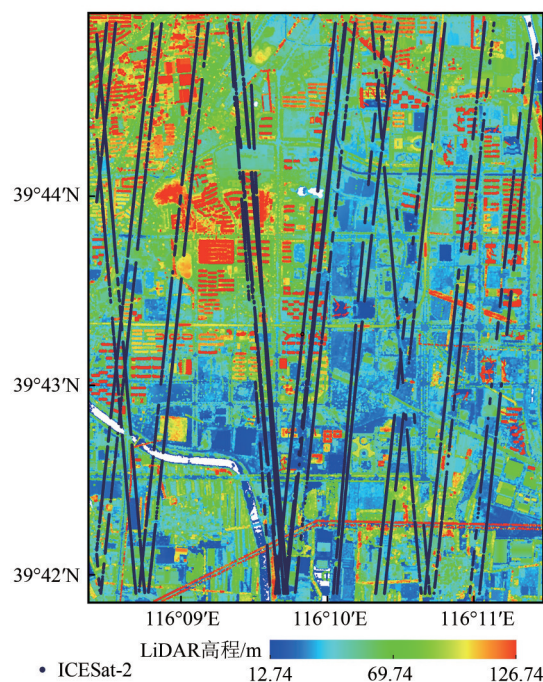


图2 ICESat-2与机载LiDAR数据

Fig. 2 ICESat-2 and Airborne LiDAR Data

上述数据集之间存在时相差异, 为降低城市土地利用变化对数据精度评估的影响, 本文结合星载激光测高数据、机载 LiDAR 数据采集了同期的谷歌地球历史影像, 识别并剔除地表变化显著区域内的星载激光点, 不纳入精度分析。同时,

考虑到星载激光测高数据获取时间覆盖多年，而城市地类矢量数据仅反映单一时相，因此图 3 仅作参考，实际分析中地类信息依据星载激光测高数据采集同期的谷歌地球历史影像进行修正。

表 1 城市地类属性
Table 1 Urban land cover types

城市地类	要素内容	代码
建筑用地	指城镇范围内的各类房屋,包括居民住房、商服楼房、工厂厂房、公共服务与管理楼房等	01
建筑附属用地	指建筑附属范围内的设施用地(停车居多)	02
交通运输用地	指各级道路,公路、铁路、高架桥等	03
农林用地	包括耕地、草地、城镇范围内的绿化林木用地、公园与广场用地等	04
其他用地	包括未利用地、裸地等	05

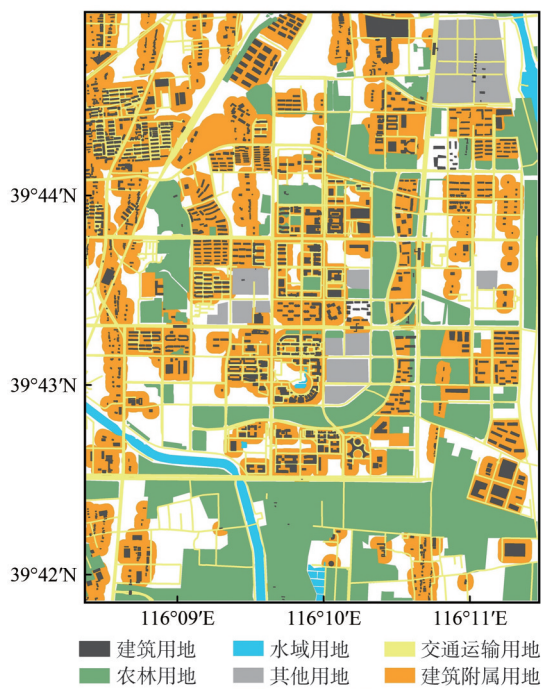


图 3 城市土地利用分布图
Fig. 3 Urban land use type distribution map

3 研究方法

3.1 星载激光测高数据精度提升

本研究综合 ATL03 与 ATL08 的优势构建城市星载测高数据集，通过星载测高数据质量参数筛选及地理定位偏移校正实现测高数据精度的提升。

3.1.1 数据质量筛选

根据 ATL03 与 ATL08 数据组织特征，对 ATL03 光子空间信息与 ATL08 分类及质量属性进行了关联，利用光子分类 (classified_pc_flag) 信息将光子分为地面光子与非地面光子，其中地面光子依据城市地类矢量数据 (代码 02—05) 进行地类划分，将落入建筑平面轮廓内的非地面光子作为候选建筑光子点，结合其地理定位高程 (h_ph)

与机载 LiDAR 参考高程差的统计分布，设定 95% 置信区间，剔除受围栏、起重机等因素干扰的异常值，保留部分作为建筑星载激光点 (代码 01)。

ICESat-2 地理定位光子的理论测高精度为 0.1 m (Magruder 等, 2021)，受城市复杂地形及大气环境等影响，可能存在部分光子点高程值异常，在统计光子插值地表高程 (h_te_interp) 与 ATL08 内置的参考 DEM 高程 (dem_h) 差值特征的基础上，设定 95% 置信区间剔除了超出范围的光子点，从而提高数据的有效性与可靠性。

同时，考虑到星载激光雷达运行环境的差异性，结合已有研究结论 (郑迎辉 等, 2022; 戴泽源 等, 2023) 在本研究区开展多组实验对比，首先提取中高置信度光子 (signal_conf_ph 为 3 或 4)，保留代表地表回波的高质量光子 (quality_ph 为 0)；随后，剔除随坡度参数增大而精度降低的光子点 (terrain_slope 大于 0.06)、统计单元内地形光子占比过低的区域 (n_te_photons/n_seg_ph 大于 20%) 以及受云影响显著 (cloud_flag_atm 大于 3) 的光子。

3.1.2 地理定位偏移校正

ICESat-2/ATLAS 数据存在一定范围的地理定位偏移，一般小于任务要求的 6.5 m，且不同波束的定位偏移存在差异 (NASA 和 GSFC, 2025; Luthcke 等, 2021)。为了校正其在水平方向及垂直方向上的定位偏移，本文以研究区 2 的机载 LiDAR 高程数据为参考，对星载激光测高数据以波束为单位在水平和垂直方向上分别迭代移动。水平方向在 ±6.5 m 范围内以 0.1 m 步长沿轨道横向和纵向偏移，实现垂直方向高程差值最小化，偏移优化受地面/非地面光子分类约束；最优水平偏移校正后，在 ±1 m 范围内沿垂直方向以 0.01 m 步长移动以最小化高程差值，获取垂直偏移量，据此调整原始光子定位，对于地理定位偏移校正后城市地

类属性发生变化的光子, 参照同期谷歌历史影像进行属性更新。地理定位偏移校正流程如下(算法1):

输入:

- photon_height, photon_geolocation, photon_class_label
- lidar_ref_elevation, building_outline

1: 定义水平搜索范围 (± 6.5 m, 步长 0.1 m 沿轨道横向和轨道纵向)

2: 定义垂直搜索范围 (± 1.0 m, 步长 0.01 m)

3: 对每一条波束数据执行:

4: 对每一个候选水平偏移量 (dx, dy):

5: photon_xy_shifted=photon_geolocation+(dx, dy)

6: 若偏移导致分类改变 (如建筑点移出 building_outline 或地面点移入 building_outline), 则跳过该偏移

7: z_idw=IDW (lidar_ref_elevation, photon_xy_shifted)

8: 若无有效数量的光子—参考点对, 则跳过该偏移

9: 计算 MAE_horizontal = mean (|photon_height - z_idw|)

10: 若 MAE_horizontal < 当前最优, 则更新 best_dx, best_dy

11: 应用最优水平偏移 (dx*, dy*) = (best_dx, best_dy)

12: 对水平校正后的波束数据执行:

13: 对每一个候选垂直偏移量 dz:

14: photon_height_shifted=photon_height+dz

15: 计算 MAE_vertical=mean (|photon_height_shifted-z_idw|)

16: 若 MAE_vertical < 当前最优, 则更新 best_dz

17: 应用最优垂直偏移 dz*=best_dz

输出:

- photon_corrected=应用最优偏移量 (dx*, dy*, dz*) 后的光子数据

- residual_stats={MAE_original, MAE_corrected, (dx*, dy*, dz*) }

3.2 精度评价方法

为定量评估 ICESat-2 测高数据在不同城市地类条件下的高程误差分布, 采用平均误差 ME

(Mean Error)、平均绝对误差 MAE (Mean Absolute Error)、均方根误差 RMSE (Root Mean Squared Error)、第 90 百分位线性误差 LE90 (Linear Error at 90% confidence level) 及决定系数 R^2 (Coefficient of Determination) 等评价指标, 对经过上述精度提升处理后的数据在研究区 1 进行总体及分地类精度评估, LE90 反映 90% 置信水平下的样本误差上限; R^2 描述 2 类数据的拟合程度, 值越接近 1 相关性越强。

$$ME = \frac{\sum(H_{SBL} - H_{ref})}{n} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum |H_{SBL} - H_{ref}|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (H_{SBL} - H_{ref})^2}{n}} \quad (3)$$

$$LE90 = \text{quantile}_{90}(|H_{SBL} - H_{ref}|) \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (H_{SBL} - H_{ref})^2}{\sum \left(H_{SBL} - \frac{\sum H_{SBL}}{n} \right)^2} \quad (5)$$

式中, H_{SBL} 表示星载光子点的地理定位高程值, H_{ref} 表示机载激光雷达提供的参考高程值, n 表示星载光子点数量。

3.3 多因子分析方法

对于每个星载光子点, 按地面与非地面类别在 1 m 邻域内搜索同类别参考机载点云, 通过插值获取参考高度, 进而统计高程差值, 并从数据自身属性 (波束类型、采集时间、季节时序) 和外部环境特征 (坡度、起伏度 Relief、植被覆盖度 FVC) 两个方面, 分析星载激光测高数据的影响因素。坡度与地形起伏度数据由机载激光点云生成的 0.5 m 分辨率 DEM 计算获得。植被覆盖度 FVC (Fractional Vegetation Cover) 通过 Google Earth Engine (GEE) 平台利用与星载激光各轨道同期的 Sentinel-2 影像计算生成, 空间分辨率为 10 m, 取值范围为 0—1。

$$Relief = H_{max} - H_{min} \quad (6)$$

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (7)$$

式中, H_{max} 与 H_{min} 表示统计单元内的最高与最低高程, $NDVI_{soil}$ 、 $NDVI_{veg}$ 表示纯裸土或无植被覆盖像元、纯植被覆盖像元的植被归一化指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)。

4 城市区域 ICESat-2 测高数据精度评估

利用研究区 2 内的机载激光点云对 26 条星载激光波束进行了地理定位偏移校正, 图 4 展示了每条波束在水平和垂直方向偏移量的分布, x 方向偏移为 $[-3.76\text{ m}, 6.39\text{ m}]$, 通常 $<\pm 3\text{ m}$, 个别波束可达 6 m , y 方向偏移为 $[-3.37\text{ m}, 2.58\text{ m}]$, 整体水平偏移为 $[0.61\text{ m}, 6.40\text{ m}]$, 优于官方 6.5 m 任务要求, 垂直偏移为 $[-0.05\text{ m}, 0.24\text{ m}]$ 。不同波束类型在定位精度上差异不显著 (表 2), 表明系统性误差受波束类型影响有限。

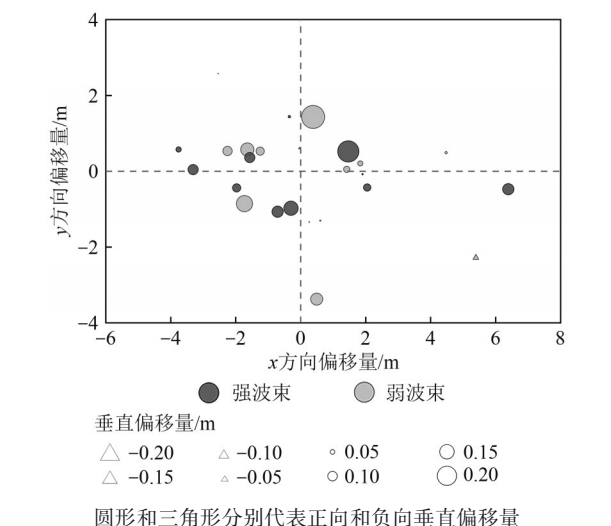


图 4 研究区 2 星载激光强弱波束的水平与垂直偏移量分布
Fig. 4 Horizontal and vertical offsets of strong and weak beams in Study Area 2

表 2 研究区 2 不同波束类型的定位偏移
Table 2 Geolocation offsets among different beam types in Study Area 2

波束类型	x 偏移绝对值 均值/m	y 偏移绝对值 均值/m	水平偏移 均值/m	垂直偏移 均值/m
强波束	2.05	0.79	2.42	0.09
弱波束	1.90	1.00	2.41	0.10

图 5 与表 3 系统展示了研究区 1 内 ICESat-2 激光测高数据提升前后的总体精度变化。图 5 为数据总体空间误差分布, 误差主要集中在 $[-2\text{ m}, 2\text{ m}]$ 。原始数据总体略有低估 (ME 为 -0.10 m), 且存在较大随机误差和离群值 (RMSE 为 1.57 m , LE90 为 1.46 m)。提升后 ME 更接近于零, 高估型与低估型误差分布更加均衡, MAE、RMSE 与 LE90 均有所下降, 直方图右侧尾部显著收缩, 整体精度提升

约 28.36%、29.30% (以 MAE、RMSE 计)。

由表 3 可见不同城市地类条件下, ICESat-2 星载激光测高数据的高程误差表现存在一定差异。建筑用地的测高数据误差相对较大, 其次为其他用地, 这主要受建筑顶部、裸地及未利用地等表面结构复杂性和不确定性较高影响。相比之下, 交通运输、建筑附属和农林用地类的测高数据误差相对较小 (提升前后 MAE 均 $\leq 0.4\text{ m}$), 其中, 交通运输用地测高数据精度最高, 道路表面平整无遮挡, 仅受少量车辆干扰, 建筑附属用地数据精度多受周边停放的车辆或堆积物影响; 农林用地测高数据精度主要受植被冠层散射、作物覆盖变化及地表识别算法限制。从数据提升效果来看, 除其他用地外, 各地类 MAE、RMSE 与 LE90 均有所下降, 表明本文方法在复杂城市环境中具有一定适用性。交通运输用地改善最显著, RMSE 由 0.75 m 降至 0.45 m ; 建筑用地改善次之, 但数据误差仍相对较大, 数据剔除率达 60.70%, 精度提升后 ME 仍呈现一定系统性负偏差 (低估), 原因可能是靠近建筑顶部的檐口、墙体光子点未能完全去除; 其他用地类型的 RMSE 略有下降, MAE 略升, 表明数据提升在削弱极端误差的同时, 可能引入了轻微的系统性偏移, 这主要源于偏移参数跨研究区迁移时受地表类型特征差异影响, 以及在该地类下存在一定不适应性。各地类拟合效果均有不同程度提升, 其中交通运输用地拟合效果最好 (R^2 为 0.98), 而其他用地仍受覆盖类型不确定性影响, 整体拟合度最低。

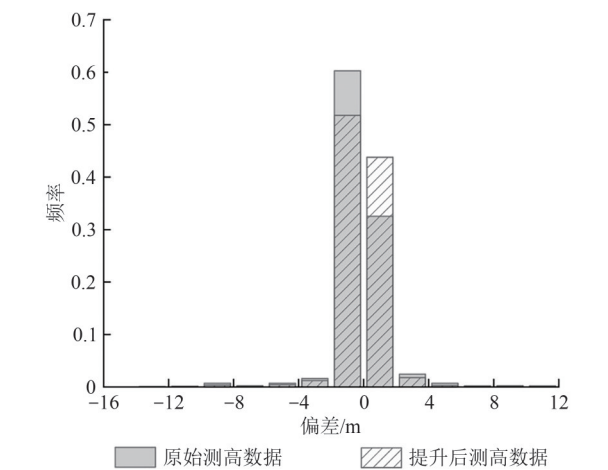


图 5 研究区 1 提升前后总体数据偏差分布直方图
Fig. 5 Histogram of deviation between pre- and post-accuracy enhancement in study area 1

表3 研究区1 ICESat-2测高数据提升前后误差统计表
Table 3 Error statistics of ICESat-2 elevation data pre- and post-accuracy enhancement in Study Area 1

城市地类	测高数据	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
建筑用地	原始	-0.36	1.69	3.24	5.35	0.93	12533
	提升后	-0.55	1.30	2.78	4.09	0.95	4926
建筑附属用地	原始	-0.03	0.41	0.83	0.84	0.95	24332
	提升后	0.05	0.34	0.75	0.69	0.97	21351
交通运输用地	原始	-0.03	0.37	0.75	0.79	0.97	9671
	提升后	0.02	0.26	0.45	0.62	0.98	8381
农林用地	原始	-0.11	0.43	0.74	1.04	0.94	20255
	提升后	-0.03	0.40	0.68	0.99	0.94	17678
其他用地	原始	0.10	1.13	1.61	2.38	0.86	3784
	提升后	0.15	1.20	1.59	2.48	0.90	3367
总体	原始	-0.10	0.67	1.57	1.46	0.97	70575
	提升后	-0.03	0.48	1.11	1.09	0.97	55703

5 城市区域 ICESat-2 测高数据精度影响因素分析

数据自身属性（波束类型、采集时间、季节时序）和外部环境特征（坡度、起伏度、植被覆盖度）是影响星载激光测高数据精度的主要因素。

5.1 数据自身属性

5.1.1 波束类型

ICESat-2强波束能量为弱波束的4倍，理论上回波光光子数也为4：1（Zhu等，2020），后者因信号偏弱、噪声干扰大及光子数量有限而稳定性较

差。根据原始数据误差统计（表4），强波束整体精度优于弱波束。经过数据精度提升处理后，两类波束均显著改善，强波束RMSE降低约26.75%，弱波束降低约43.67%，噪声与低质量光子的剔除使弱波束在一定程度上优于强波束。两类波束在不同地类中的数据精度表现各不相同，如图6所示，除农林用地外，弱波束在多数其他地类中数据误差更小，这可能与信号强度影响植被穿透性有关。总体而言，数据精度提升在一定程度上减小了系统性偏差，使弱波束受益更显著且提升了使用价值；而强波束由于光子样本量充足，其拟合度与稳定性仍保持相对优势。

表4 强弱波束提升前后测高数据误差统计表
Table 4 Error statistics of strong and weak beams pre- and post-accuracy enhancement

波束类型	测高数据	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
强波束	原始	-0.13	0.66	1.57	1.42	0.97	57458
	提升后	-0.03	0.49	1.15	1.09	0.97	46338
弱波束	原始	0.01	0.71	1.58	1.71	0.95	13117
	提升后	-0.02	0.45	0.89	1.08	0.96	9365

5.1.2 采集时间

光子计数激光雷达在地形测高中面临区分噪声光子与信号光子的挑战，太阳背景噪声会降低地面查找算法的质量，因此夜间采集较日间采集更有利于准确捕捉地形高度（Neuenschwander等，2020）。表5显示，夜间原始数据平均偏差更接近于零（ME为-0.03 m），日间数据存在一定低估（ME为-0.13 m），且日间MAE、RMSE、LE90

和 R^2 均劣于夜间，表明在复杂城市环境下，夜间原始测高数据精度略优。数据精度提升处理后，日间和夜间数据误差均有所改善，其中日间RMSE下降约33.33%，夜间下降约9.60%，且日间数据精度与夜间相当。原因可能在于日间采集的光子样本量更充足，在噪声光子与低质量光子得到有效抑制后，能够更准确地捕获地表信息；而夜间光子样本量有限，在提高数据质量的同时也增加

了点的离散性，导致夜间整体拟合度下降 (R^2 由 0.98 降至 0.95)。雷达图进一步表明 (图 7)，夜间

采集数据的误差分布更为分散，从而影响其拟合表现。

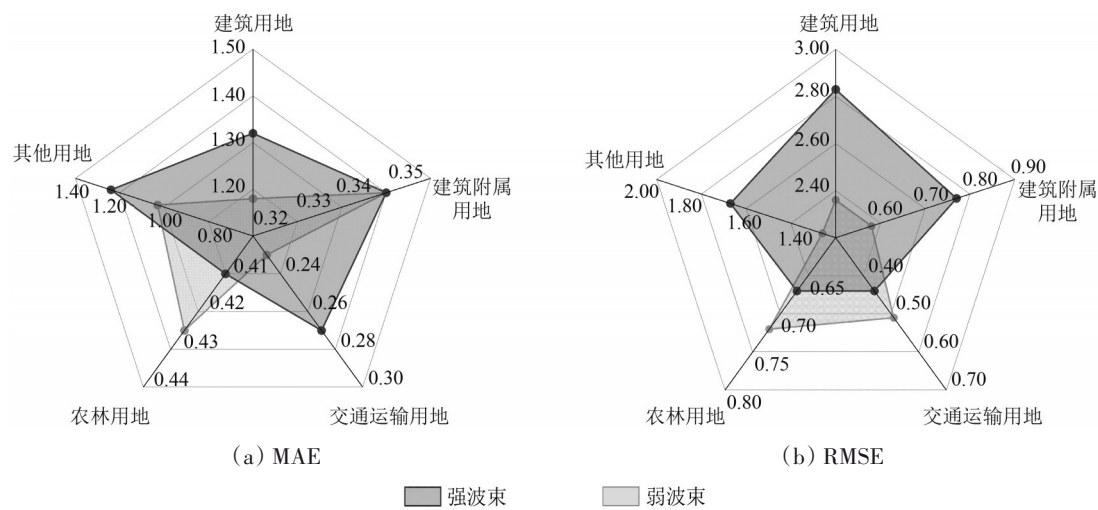


图 6 提升后不同地类波束测高数据精度雷达图

表 5 日间/夜间提升前后测高数据误差统计表

Table 5 Daytime and nighttime elevation error statistics pre- and post-accuracy enhancement

采集时间	测高数据	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
日间	原始	-0.13	0.70	1.65	1.56	0.97	55563
	提升后	-0.02	0.49	1.10	1.15	0.97	43254
夜间	原始	-0.03	0.56	1.25	1.09	0.98	15012
	提升后	-0.03	0.47	1.13	0.94	0.95	12449

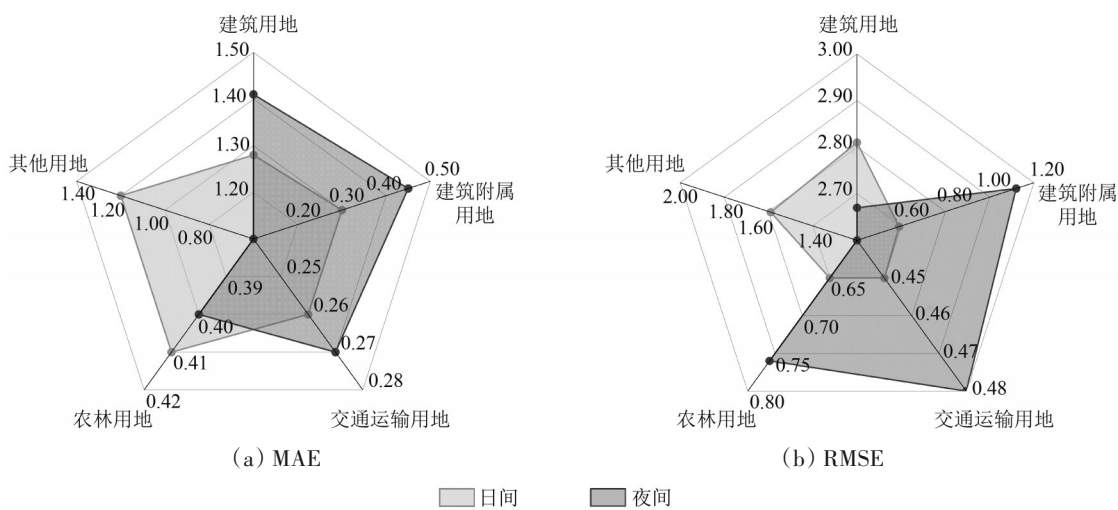


图 7 提升后不同地类采集时间测高数据精度雷达图(其他用地类样本量较少,未收集到夜间数据)

Fig.7 Radar chart of elevation accuracy for different land cover types and acquisition times after accuracy enhancement (No nighttime data were collected for other land cover types because of the limited sample size)

5.1.3 季节时序

由于 ICESat-2 卫星过轨时间具有周期性，且观测受研究区范围、地表反射率、植被状况及大气透明度等因素影响，本研究获取的数据在季节

分布上呈现明显不均衡。在 2019 年—2024 年，研究区共获取 26 条波束数据，其中冬季 14 条，光子数量约占 61.15%，显著高于其他季节；春、夏、秋季分别为 4、2 和 6 条。整体来看 (表 6)，研究区内

春季测高数据精度最高 (R^2 为 0.98), 冬季次之, 早春及冬季植被稀疏、背景辐射较弱、地面反射条件良好及激光回波稳定提升了光子信号质量。相比之下, 夏、秋两季数据误差明显增大且光子样本量有限, 主要受云雾、植被生长旺盛、太阳背景噪声增强及卫星过轨规律等因素影响。在分地类尺度上

(图8), 季节效应表现较为复杂, 秋季在多数地类中数据精度最低, 冬季次之; 夏季虽整体数据误差较大, 但除建筑附属用地外, 其他地类误差均优于冬季, 该差异可能受秋季落叶不均、冬季积雪及大气条件复杂度增加等因素影响, 反映了星载测高数据对不同地类环境条件的敏感性差异。

表6 ICESat-2激光测高数据提升后季节性误差统计表
Table 6 Seasonal error statistics of ICESat-2 elevation data after accuracy enhancement

季节时序(月份)	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
春(3—5月)	-0.02	0.39	0.78	0.95	0.98	8929
夏(6—8月)	0.18	0.56	1.43	0.91	0.93	3403
秋(9—11月)	-0.16	0.54	1.12	1.15	0.95	9310
冬(12—2月)	-0.02	0.49	1.14	1.12	0.96	34061

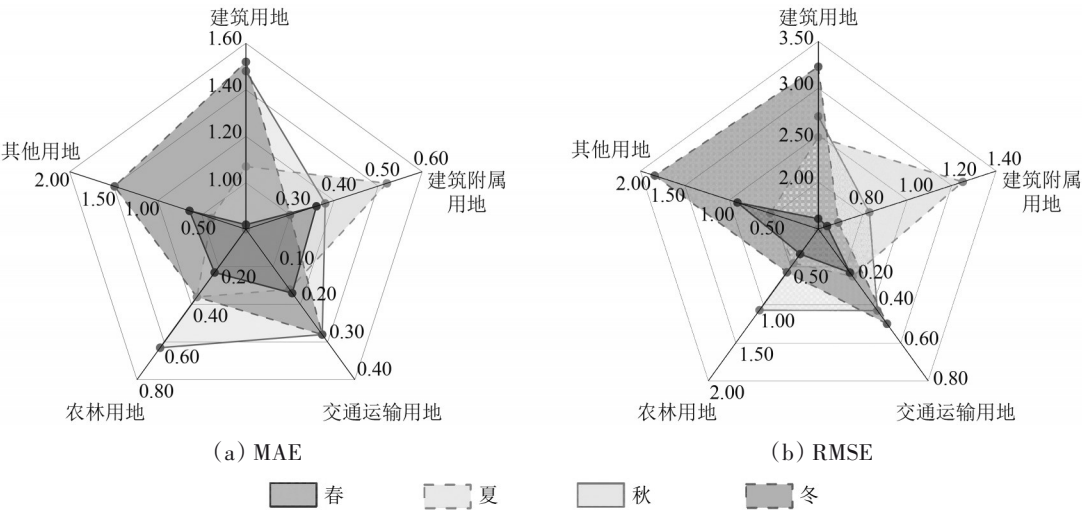


图8 提升后不同地类季节测高数据精度雷达图(其他用地类样本量较少,未收集到秋季数据)
Fig. 8 Radar chart of elevation accuracy for different land cover types and seasons after accuracy enhancement
(No autumn data were collected for other land cover types because of the limited sample size)

5.2 外部环境特征

5.2.1 坡度

结合研究区地形特征与星载激光点分布情况, 对坡度进行分级 (表7)。总体而言, ICESat-2 测高数据误差随坡度增大呈增加趋势, 各坡度等级下均未表现出明显系统性误差。极缓坡与缓坡地形下的 MAE 分别为 0.41 m 和 0.42 m, 拟合度为

0.96—0.98, 数据精度稳定。中坡及陡坡地形下的数据精度明显下降, 其中陡坡的 MAE 较极缓坡提高约 75.61%, 这主要归因于高坡地形下激光点投射更易受地物边界 (如路缘石) 和坡向差异影响, 导致测高结果偏离真实高程。因此, 在复杂城市环境中, ICESat-2 数据在低坡地形条件下具有较高精度, 而在高坡地形下需结合其他数据或方法进行误差修正。

表7 ICESat-2激光测高数据提升后误差随坡度分带统计表
Table 7 Error statistics of ICESat-2 elevation data across slope bands after accuracy enhancement

坡度类型/(°)	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
极缓坡(0—2)	-0.05	0.41	1.24	0.65	0.96	20759
缓坡(2—5)	0.04	0.42	0.93	0.96	0.98	15896
中坡(5—15)	-0.04	0.56	1.05	1.39	0.97	12928
陡坡(≥15)	-0.10	0.72	1.18	1.55	0.92	6120

5.2.2 地形起伏度

城市区域整体地形较为平坦, 研究区的起伏度分布在 0—5 m。结合地貌特征与数据分辨率, 对起伏度进行经验性分级 (表 8)。整体来看, 测高数据精度随地形起伏度增加而下降。平坦地形下数据误差相对较小, 光子样本量占比达 98.5%, 表明高差变化幅度小的地形条件下数据精度较高且稳定。轻微起伏地形中, 局部坡度开始变化,

但尚未形成连续坡面, 激光足迹内可能存在多种城市微地貌的高度变化, 回波反射混杂, 误差方向呈不一致性, 线性拟合趋势减弱 (R^2 为 0.87)。在起伏较大的区域, 数据误差显著增大, LE90 达 5.34 m, 存在明显高估现象 (ME 为 1.13 m), 这主要受激光足迹内光子高差变化增大影响。总体而言, 在平坦城市地形中, ICESat-2 测高数据表现出较高的精度与可靠性, 具备较好的应用价值。

表 8 ICESat-2 激光测高数据提升后误差随起伏度分带统计表

Table 8 Error statistics of ICESat-2 elevation data across terrain roughness bands after accuracy enhancement						
地形起伏度/m	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
平坦(0—1)	-0.03	0.48	1.10	1.06	0.97	54786
轻微起伏(1—3)	-0.05	0.90	1.49	2.11	0.87	887
起伏(3—5)	1.13	2.45	3.17	5.34	0.94	29

5.2.3 植被覆盖度 FVC

参考城市生态研究成果 (Yang 等, 2025), 对 FVC 进行分级 (表 9)。结果表明, 总体数据误差随植被覆盖度增加呈轻微下降趋势, 说明在复杂城市环境中, 高覆盖植被区的测高数据精度相对较高。空间上, 高覆盖区域植被分布连续、结构较为均一, 激光足迹内反射类型相对单一, 随机误差较小 (MAE 为 0.38 m, RMSE 为 0.48 m); 但

系统性偏差相对明显 (ME 为 0.26 m), 反映出激光测量易受树冠散射影响, 存在整体性高估。低、中覆盖区域中, 建筑、道路、草地和裸地等类型交错分布, 激光足迹内光子混合反射使随机误差增大 (MAE、RMSE 升高), 而较高的地表暴露度又使系统性偏差较小 (ME 更接近零)。结合季节分析结果可知, ICESat-2 测高数据误差不仅受植被覆盖度影响, 还与季节性植被状态变化密切相关。

表 9 ICESat-2 激光测高数据提升后误差随 FVC 分带统计表

Table 9 Error statistics of ICESat-2 elevation data across FVC bands after accuracy enhancement						
FVC	ME/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	R^2	数量/个
低覆盖(0—0.3)	-0.03	0.49	1.12	1.10	0.97	52888
中等覆盖(0.3—0.6)	-0.06	0.49	0.95	1.08	0.95	2107
高覆盖(0.6—1.0)	0.26	0.38	0.48	0.78	0.98	708

6 结 论

为系统性评估 ICESat-2 在城市区域测高应用中的精度表现及其影响因素, 本研究选取 2019—2024 年 ICESat-2 测高产品的 26 条波束数据, 以机载激光雷达数据为参考, 综合采用高程异常值剔除、质量参数筛选及地理定位偏移校正等方法, 以实现测高数据整体精度的优化处理, 提高日间采集数据及弱波束数据的可用性, 增加高精度 ICESat-2 测高产品的可用数据量。并在此基础上, 系统评估了 ICESat-2 在复杂城市环境下的总体及分地类测高数据精度, 并进一步探讨了其与波束强弱、昼夜采集、季节分布、坡度、起伏度及植

被覆盖度等多因子之间的关系。主要结论如下:

(1) ICESat-2 原始测高数据中, 超过 92% 的误差集中在 $[-2\text{ m}, 2\text{ m}]$, 其余不足 8% 的数据分布在 $[-14\text{ m}, 12\text{ m}]$ 的尾部区间, 整体表现为以小误差为主的不对称分布, 并存在一定长尾效应。数据精度提升后, 系统性偏差与长尾误差明显削弱, MAE 和 RMSE 均下降约 28.83%, ME 为 -0.03 m, MAE 为 0.48 m, RMSE 为 1.11 m, 拟合度保持不变, 数据保留率为 78.93%, 总体数据精度显著改善。

(2) ICESat-2 测高数据在不同城市地类条件下的高程误差表现存在一定差异。建筑用地和其他用地类测高数据误差相对较大, 而交通运输、建筑附属及农林用地类数据误差较小。数据精度

提升后, 各类城市用地的数据精度均有所改善, 其中交通运输用地改善最为显著, 验证了本文方法在复杂城市环境下的适用性。

(3) 从数据自身属性分析, 原始测高数据中强波束和夜间数据精度较高, 优化后弱波束与日间数据提升幅度更显著 (RMSE 分别下降 43.67%、33.33%), 有效提升了其应用价值。季节性差异在优化前后保持一致, 春、冬两季数据精度较高, 夏、秋两季因植被和噪声干扰, 数据误差偏大, 不同地类对环境条件的敏感性存在差异。

(4) 从外部环境特征分析, ICESat-2 测高数据精度受地形与植被共同制约。低坡、平坦地形下数据误差小且稳定; 中高坡及起伏较大的区域, 由于激光足迹内光子高差变化与激光点投射的边界效应影响, 数据精度明显下降。高覆盖植被区数据随机误差较小, 拟合度较高, 但易受树冠影响产生高估; 低、中覆盖区数据随机误差相对较大。

星载激光测高卫星 ICESat-2 可以获取全球范围的高程数据, 为城市高精度三维建模等应用提供重要的数据补充。本研究以机载激光点云作为参考数据, 对星载测高数据进行了偏移校正, 并在相邻研究区对校正后的星载测高数据开展了误差分析, 验证了本文方法在无机载 LiDAR 区域的适用性与可迁移性, 能够在缺乏参考数据的条件下改善测高数据精度。后续研究可进一步探讨星载测高数据局部偏移校正更大空间尺度上的精度提升效果, 以降低对高精度参考数据的依赖和处理成本。同时, 用于验证的参考数据可能对星载激光测高数据的偏移校正和精度评估结果产生一定的影响, 未来可以引入不同类型、不同获取时间的参考数据, 并对其影响进行对比分析。此外, 本文对影响星载激光测高数据精度的相关因子进行了逐一分析, 未来可以结合地理加权回归等方法, 进一步探讨多个因子对测高数据误差的复合影响。

参考文献 (References)

- Brunt K M, Neumann T A and Smith B E. 2019. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the Antarctic ice sheet. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 13072-13078 [DOI: 10.1029/2019GL084886]
- Buzzanga B, Heijkoop E, Hamlington B D, Nerem R S and Gardner A. 2021. An assessment of regional ICESat-2 sea-level trends. *Geophysical Research Letters*, 48(9): e2020GL092327 [DOI: 10.1029/2020GL092327]
- Dai Z Y, Zhang L H, Zhang L, Liu X, Zhou Y F and Chen Q. 2023. A method of island elevation control point extraction utilizing ICESat-2 data. *Journal of Geo-information Science*, 25(8): 1559-1569 (戴泽源, 张立华, 张林, 刘翔, 周寅飞, 陈秋. 2023. 适用于海岛的 ICESat-2 高程控制点提取方法. *地球信息科学学报*, 25(8): 1559-1569) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2023.220868]
- Du S H, Liu H, Xing J H, Zhang X Y, Zhang J Y, Guan X Y and Du S H. 2025. Estimating individual building heights by integrating spaceborne LiDAR and multisource remote sensing data: a CNN-transformer model and a semi-supervised sample augmentation approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63: 5406719 [DOI: 10.1109/TGRS.2025.3601205]
- He L, Pang Y, Zhang Z J, Liang X J and Chen B W. 2023. ICESat-2 data classification and estimation of terrain height and canopy height. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118: 103233 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103233]
- Hu H C, Zhu J J, Fu H Q, Manuel L S J, Cristina G, Zhang T and Liu K. 2025. Large-scale sub-canopy topography estimation from TanDEM-X InSAR and ICESat-2 data using machine learning method. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(1): 191-202 (胡华参, 朱建军, 付海强, Manuel L S J, Cristina G, 张涛, 刘奎. 2025. 基于机器学习联合 TanDEM-X InSAR 和 ICESat-2 数据估计大范围林下地形. *遥感学报*, 29(1): 191-202) [DOI: 10.11834/jrs.20233152]
- Huang X, Cheng F, Bao Y L, Wang C, Wang J L, Wu J E, He J L and Lao J Y. 2024. Urban building height extraction accommodating various terrain scenes using ICESat-2/ATLAS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130: 103870 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103870]
- Kuang S, McGill M, Gomes J, Selmer P, Finneman G and Begolka J. 2025. Global aerosol climatology from ICESat-2 lidar observations. *Remote Sensing*, 17(13): 2240 [DOI: 10.3390/rs17132240]
- Li B B, Xie H, Liu S J, Sun Y, Xu Q and Tong X H. 2023. Correction of ICESat-2 terrain within urban areas using a water pump deployment criterion with the vertical contour of the terrain. *Remote Sensing of Environment*, 298: 113817 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113817]
- Li G Y and Tang X M. 2022. Accuracy evaluation of large lake water level measurement based on GF-7 laser altimetry data. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 138-147 (李国元, 唐新明. 2022. 高分七号卫星激光测高数据大型湖泊水位测量精度评估. *遥感学报*, 26(1): 138-147) [DOI: 10.11834/jrs.20221195]
- Li X B, Huang X D and Liu A L. 2022. Snow depth retrieval from spaceborne LiDAR ICESat-2. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(3): 1091-1099 (李旭冰, 黄晓东, 刘爱利. 2022. 基于星载激光雷达 ICESat-2 的雪深监测方法研究. *冰川冻土*, 44(3): 1091-1099) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0101]
- Lian W Q, Zhang G, Cui H, Chen Z W, Wei S D, Zhu C Y and Xie Z G. 2022. Extraction of high-accuracy control points using ICESat-2 ATL03 in urban areas. *International Journal of Applied Earth*

- Observation and Geoinformation, 115: 103116 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.103116]
- Liu M B, Wang P, Hu K L, Gu C J, Jin S Y and Chen L. 2024. A method for extracting high-resolution building height information in rural areas using GF-7 data. *Sensors*, 24(18): 6076. [DOI: 10.3390/s24186076]
- Liu W X, Tsamados M, Petty A, Jin T Y, Chen W B and Stroeve J. 2025. Enhanced sea ice classification for ICESat-2 using combined unsupervised and supervised machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 318: 114607 [DOI: 10.1016/j.rse.2025.114607]
- Luthcke S B, Thomas T C, Pennington T A, Rebold T W, Nicholas J B, Rowlands D D, Gardner A S and Bae S. 2021. ICESat-2 pointing calibration and geolocation performance. *Earth and Space Science*, 8(3): e2020EA001494 [DOI: 10.1029/2020EA001494]
- Magruder L, Neumann T and Kurtz N. 2021. ICESat-2 early mission synopsis and observatory performance. *Earth and Space Science*, 8(5): e2020EA001555 [DOI: 10.1029/2020EA001555]
- Meng G, Zhao D, Xu C, Chen J H, Li X W, Zheng Z J and Zeng Y. 2024. Forest aboveground biomass estimation combining ICESat-2 and GEDI spaceborne LiDAR data. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(6): 1632-1647 (孟鸽, 赵旦, 许聪, 陈俊华, 李秀纹, 郑朝菊, 曾源. 2024. 联合 ICESat-2 和 GEDI 星载激光雷达数据的森林地上生物量估算. *遥感学报*, 28(6): 1632-1647) [DOI: 10.11834/jrs.20222120]
- NASA, GSFC. 2025. Algorithm Theoretical Basis Document for Precision Pointing Determination Version 2.0. GSFC
- Neuenschwander A, Guenther E, White J C, Duncanson L and Montesano P. 2020. Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112110 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112110]
- Tang X Y, Yu G J, Li X C, Taubenböck H, Hu G H, Zhou Y Y, Peng C, Liu D J, Huang J X, Liu X P and Gong P. 2025. A flexible framework for built-up height mapping using ICESat-2 photons and multisource satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 318: 114572 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114572]
- Wang S F and Liu C. 2022. Urban forest canopy height modeling using spaceborne laser ICESAT-2 LIDAR. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1004(1): 012023 [DOI: 10.1088/1755-1315/1004/1/012023]
- Wu B, Huang H L and Zhao Y. 2023. Utilizing building offset and shadow to retrieve urban building heights with ICESat-2 photons. *Remote Sensing*, 15(15): 3786 [DOI: 10.3390/rs15153786]
- Yang H, Chu S W, Zeng H and Zhao Y B. 2025. Relationship between urban forest structure and seasonal variation in vegetation cover in Jinhua City, China. *Forests*, 16(7): 1129 [DOI: 10.3390/f16071129]
- Zhao Y. 2023. Building Urban Digital Elevation Model Using ICESat-2 Data. Shanghai: East China Normal University (赵一. 2023. 基于 ICESat-2 数据的城市数字高程模型建立研究. 上海: 华东师范大学) [DOI: 10.27149/d.cnki.gghdsu.2023.004079]
- Zhao Y, Wu B, Li Q X, Yang L, Fan H C, Wu J P and Yu B L. 2023. Combining ICESat-2 photons and Google Earth Satellite images for building height extraction. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117: 103213 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103213]
- Zhao Y, Wu B, Shu S, Yang L, Wu J P and Yu B L. 2022. Evaluation of ICESat-2 ATL03/08 surface heights in urban environments using airborne LiDAR point cloud data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 7002905 [DOI: 10.1109/LGRS.2021.3127540]
- Zheng Y H, Zhang Y, Wang T, Zhao X, Zhang K and Wang L H. 2022. Elevation control points extraction and accuracy validation based on ICESat-2 data. *Journal of Geo-information Science*, 24(7): 1234-1244 (郑迎辉, 张艳, 王涛, 赵祥, 张昆, 王龙辉. 2022. 基于 ICESat-2 数据的高程控制点提取和精度验证. *地球信息科学学报*, 24(7): 1234-1244) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2022.210667]
- Zhu X X, Nie S, Wang C and Xi X H. 2020. The performance of ICESat-2's strong and weak beams in estimating ground elevation and forest height//2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Waikoloa: IEEE: 6073-6076 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323094]
- Zhu X X, Wang C, Xi X H, Nie S, Yang X B and Li D. 2020. Research progress of ICESat-2/ATLAS data processing and applications. *Infrared and Laser Engineering*, 49(11): 20200259 (朱笑笑, 王成, 习晓环, 聂胜, 杨学博, 黎东. 2020. ICESat-2 星载光子计数激光雷达数据处理与应用研究进展. *红外与激光工程*, 49(11): 20200259) [DOI: 10.3788/IRLA20200259]

Accuracy assessment and analysis of ICESat-2 Altimetry Data in urban areas based on multiple factors

ZHANG Yuwei, WANG Tao, ZHONG Shuxian, LI Xiaoyu

1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Key Laboratory of Land Subsidence Mechanism and Mitigation of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: ICESat-2 satellite laser altimetry data have the advantages of high accuracy, high temporal resolution, and low cost, making them a valuable data source for urban 3D modeling. However, systematic accuracy assessments of these data in urban environments remain limited.

This study designed and implemented a methodology to improve the accuracy of ICESat-2 altimetry data using airborne LiDAR data and to evaluate the performance of the corrected data. On the basis of the ATL03 and ATL08 products, a complete urban spaceborne altimetry dataset was first generated for the study area. Elevation outliers were removed, and quality screening was conducted on the basis of multiple attributes of the original ICESat-2 data. Subsequently, airborne LiDAR point clouds from one part of the study area were used to perform horizontal and vertical geolocation offset correction on the spaceborne altimetry data. The accuracy of the corrected ICESat-2 data was then evaluated in another part of the study area. Finally, data accuracy was analyzed in consideration of multiple factors, including urban land cover types, strong and weak beams, acquisition time, acquisition season, terrain slope, and fractional vegetation cover. Results showed that the original ICESat-2 altimetry data in the study area exhibited a slight underestimation ($ME=-0.10$ m), with MAE, RMSE, and LE90 of 0.67, 1.57, and 1.46 m, respectively. Specifically, spaceborne laser data over construction land and other land cover categories demonstrated relatively low accuracy, whereas data over transportation areas, building ancillary land, and agricultural and forestry land exhibited higher accuracy. After correction, the systematic bias and long-tail errors of the ICESat-2 altimetry data were effectively reduced, and the overall accuracy was significantly improved ($MAE=0.48$ m, $RMSE=1.11$ m). In particular, the accuracy of data acquired by weak beams and during daytime was enhanced significantly. Data acquired in spring and winter, over low-slope terrain and areas with high vegetation coverage, exhibited higher accuracy.

This study demonstrates that local high-accuracy airborne LiDAR data can be used to correct ICESat-2 altimetry data and effectively improve their accuracy in adjacent regions. The usability of daytime and weak-beam ICESat-2 data is enhanced, and the number of high-quality photons increases accordingly. This work can support urban 3D modeling and information fusion using ICESAT-2 data.

Key words: ICESat-2, spaceborne LiDAR altimetry, data correction, accuracy assessment, multiple factors, urban three-dimensional modeling

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42471464)