

ICESat-2 星载光子计数激光雷达数据处理与应用研究进展

朱笑笑^{1,2}, 王 成^{1,2}, 刁晓环¹, 聂 胜¹, 杨学博^{1,2}, 黎 东¹

- (1. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要: ICESat-2/ATLAS 系统首次采用微脉冲多波束光子计数激光雷达技术, 其在探测方式、数据处理方法、应用的广度和深度等方面与 ICESat-1/GLAS 存在明显差异。首先介绍了 ICESat-2 及 ATLAS 的性能指标、数据特点和产品信息, 详细分析了光子点云去噪和分类两个关键技术, 以及各算法的适应性及难点, 总结了 ICESat-2 数据在冰盖和海冰高程测量及其变化监测、地面高程提取、森林高度提取和生物量估算、湖泊水位和蓄水量变化监测等方面的应用, 最后展望了光子数据处理和应用的发展趋势和前景。

关键词: 星载激光雷达; ICESat-2/ATLAS; 光子计数; 光子去噪; 遥感应用
中图分类号: P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200259

Research progress of ICESat-2/ATLAS data processing and applications

Zhu Xiaoxiao^{1,2}, Wang Cheng^{1,2}, Xi Xiaohuan¹, Nie Sheng¹, Yang Xuebo^{1,2}, Li Dong¹

- (1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ICESat-2/ATLAS employed a micro-pulse multi-beam photon-counting laser altimeter system for the first time. ICESat-2/ALTAS was significantly different from ICESat-1/GLAS in terms of detection mechanism, data processing methods and the breadth and depth of data applications. Firstly, the key configuration parameters, data and products of ICESat-2/ATLAS were introduced. Secondly, the key technologies of noise removal and classification algorithms for ICESat-2/ATLAS data as well as the adaptability and problems of each algorithm were elaborated. Thirdly, the applications of ICESat-2/ATLAS data in ice sheet and sea ice elevation measurement and change monitoring, ground elevation and forest height extraction, forest biomass estimation, lake level and storage change monitoring were summarized. Finally, the development trend and prospect of photon-counting LiDAR data processing methods and applications were expected.

Key words: space-borne LiDAR; ICESat-2/ATLAS; photon-counting; noise removal; remote sensing application

收稿日期:2020-06-29; 修订日期:2020-07-25

基金项目:广西自然科学基金创新研究团队资助项目(2019GXNSFGA245001);国家自然科学基金(41901289, 42071405);中国科学院青年创新促进会(2019130)

作者简介:朱笑笑(1993-),女,博士生,主要从事星载激光雷达数据处理及应用方面的研究工作。Email: zhuxx@radi.ac.cn

导师简介:王成(1975-),男,研究员,博士生导师,博士,从事激光雷达遥感方面的研究工作。Email: wangcheng@aircas.ac.cn

0 引言

激光雷达 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 是一种主动式遥感探测技术,可以快速、直接获取探测目标的高精度三维空间信息^[1]。星载激光雷达运行轨道高、覆盖范围广,被广泛应用于制作全球控制点库、监测极地冰川变化和湖泊水位,以及森林生物量碳储量估算等^[2-4]。

目前已有多颗对地观测卫星搭载了激光雷达系统,其中美国 NASA 于 2003 年发射的冰、云和陆地高程卫星 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite, ICESat) 搭载了全波形激光雷达系统 (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)^[5], 在其在轨运行的 6 年间, 获取了全球包括极地在内的海量波形激光雷达数据, 并对全球变化研究等提供了重要的数据源。ICESat 于 2009 年失效后, NASA 于 2018 年相继发射了 ICESat-2 和 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation, GEDI)^[6], 前者搭载了光子计数激光测高仪 (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS), 后者为全波形激光雷达载荷, 搭载于国际空间站的全球生态系统动力学调查卫星。我国于 2019 年 11 月发射了高分七号卫星, 同时搭载了双线阵立体相机和全波形激光测高仪^[7]。

不同于 GLAS、GEDI 等全波形激光雷达系统, ICESat-2/ATLAS 采用了微脉冲多波束光子计数激光雷达技术, 这是该技术首次应用于卫星平台^[8-9]。它采用更加灵敏的单光子探测器, 具有更高的脉冲重复频率, 可以获取光斑更小、密度更高的光子点云数据, 进而实现更精细的地表三维信息提取。由于光子计

数激光雷达系统的发射和接收信号均为弱信号, 故受噪声 (尤其是太阳背景噪声) 干扰极大, 这给光子数据处理与应用研究带来了巨大挑战。此外, 作为一种新型星载激光雷达系统, 其数据应用广度和深度也有不同。

文中介绍了目前唯一在轨的星载光子计数激光雷达系统 ICESat-2/ATLAS, 对其数据处理和应用进展进行总结分析, 对当前研究中存在的问题提出了展望。

1 ICESat-2/ATLAS 简介

ICESat-2 于 2018 年 9 月 15 日成功升空, 是美国继 ICESat 失效后发射的新一代星载激光雷达卫星。其主要科学目标包括: (1) 定量评估极地冰盖对当前和近期海平面变化的贡献; (2) 量化冰盖变化的区域特征, 评估其变化驱动机制, 并改进冰盖预测模型; (3) 估算海冰厚度, 研究海冰/海洋/大气之间的能量、物质和水分交换; (4) 测量植被高度, 揭示大区域植被生物量现状及其变化规律^[8]。

ICESat-2 轨道高度约 500 km, 倾角为 92°, 观测覆盖范围为 88°S~88°N, 重复周期为 91 天, 每个周期有 1387 个轨道。ATLAS 系统搭载了两个激光器, 通常仅有一个处于工作状态, 以 10 kHz 重复频率发射单脉冲 (532 nm), 脉冲宽度 1.5 ns, 可以获取沿轨道间隔约 0.7 m、直径约 17 m 的重叠光斑。ATLAS 共发射 6 束激光束, 在沿轨方向分 3 组平行排列 (图 1), 每组分别包含一个强信号和一个弱信号, 二者能量比为 4 : 1; 每组之间跨轨距离约 3.3 km, 组内跨轨距离约为 90 m。表 1 给出了 ICESat-2/ATLAS 的主要性能指标。

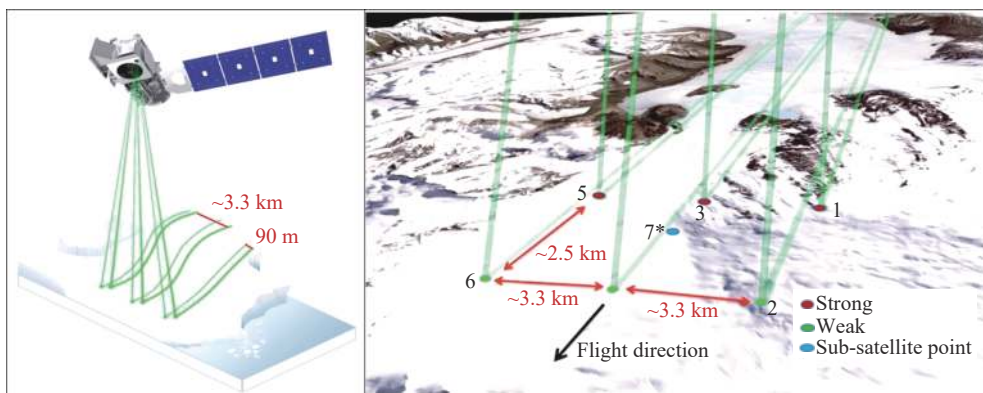


图 1 ICESat-2/ATLAS 波束分布示意图^[10]

Fig.1 ICESat-2/ATLAS beams distribution sketch map^[10]

表 1 ICESat-2/ATLAS 平台和传感器关键参数^[8]

Tab.1 Configuration parameters of ICESat-2 and ATLAS^[8]

Parameters	Values	Parameters	Values	Parameters	Values
Altitude/km	500	Orbit coverage	88°S~88°N	Number of beams	6 organized in 3 pairs
Orbit inclination/(°)	92	Along-track separation/m	~0.7	Distance within a pair/m	~90
Track repeat period/d	91	Transmitted pulse width/ns	1.5	Distance between beam pairs/km	~3.3
Laser wavelength/nm	532	Pulse repetition rate/kHz	10	Beam energy per pulse(strong, weak)/μJ	175±17, 45±5
Footprint size/m	~17	Telescope diameter/m	0.8	Beam energy ratio (strong: weak)	4 : 1

ICESat-2/ATLAS 包括 20 种标准数据产品 ATL00-ATL21^[8], 分为 0 级、1 级、2 级和 3 级, 分别用 Level0、Level1、Level2、Level3 表示。ATL00 为 0 级产品, 提供原始遥测数据; ATL01 和 ATL02 为 1 级产品, 是经过格式转换和仪器误差纠正后的遥测数据; ATL03 和 ATL04 是 2 级产品, 其中 ATL03 将光子往返时间、激光器位置和姿态角数据结合以确定 ATLAS 接收光子数据的大地测量位置 (即经纬度和高度); ATL06-ATL21 是 3 级产品, 提供冰川、冰盖高度、海冰高度、植被冠层高度和内陆水体高程等信息。数据产品详细描述见 <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>。

ICESat-2 卫星在发射前, 为了测试光子数据质量和性能, NASA 对典型研究区进行了机载飞行实验, 获取了一系列机载模拟光子数据, 如多极化光子计数激光雷达数据 (Slope Imaging Multi-polarization Photon-counting Lidar, SIMPLE)、Sigma Space、多波束激光雷达数据 (Multiple Altimeter Beam Experimental Lidar, MABEL) 和 MATLAS 数据。基于这些机载模拟光子数据, 国内外学者开展了多项研究, 为后续 ICESat-2/

ATLAS 数据处理和应用奠定了基础^[10-13]。机载模拟光子数据可免费下载 (<https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/data>)。

ICESat-2/ATLAS 数据于 2019 年 5 月在美国冰雪数据中心 NSIDC(National Snow & Ice Data Center) 公开发布, 免费下载网址: <https://nsidc.org/data/icesat-2/data-sets>。

2 光子点云数据处理研究进展

光子计数 LiDAR 的发射脉冲是弱信号, 受噪声 (太阳背景噪声、系统噪声、大气散射噪声) 影响极大。图 2 显示了不同地表覆盖 (森林、冰川、湖泊) 的 ICESat-2/ATLAS 数据空间分布, 可以看出: 光子噪声的空间分布随机广泛, 严重影响地表信息的精确提取, 因此, 有效剔除强背景噪声是光子计数 LiDAR 数据处理的关键。

在冰川、海冰和湖泊等区域, 通过光子去噪算法获取的信号点即是其对应的地表信号光子, 但在森林区域, 为了提取光子数据中的冠层参数, 还需要将信号光子点分类为地面光子点、冠层点和冠层顶部光子点。

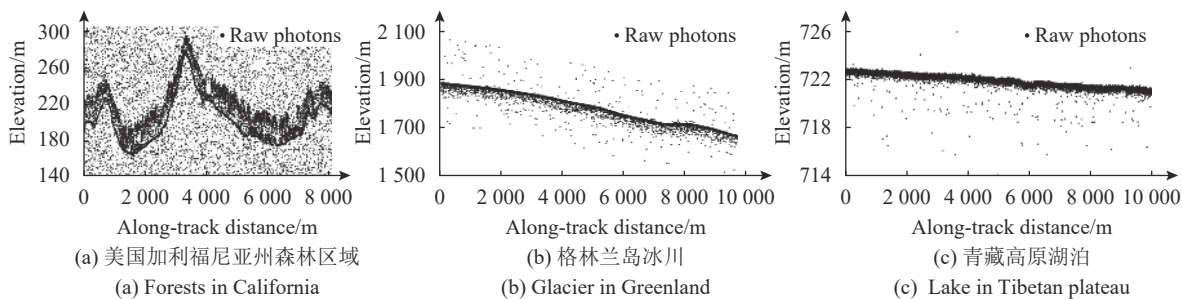


图 2 ICESat-2/ATLAS 数据分布示例

Fig.2 Distribution of ICESat-2/ATLAS data

2.1 光子去噪

光子点云去噪的主要方法可归纳为以下三类:

(1) 基于栅格图像处理的去噪算法

通过将剖面光子点云转化为二维栅格图像,

并采用图像处理技术来剔除噪声点。该算法能够在一定程度上去除光子噪声,但光子点云在内插成栅格图像的过程中会损失部分有用信息,降低去噪算法的精度^[14-15]。

(2) 基于密度空间聚类的去噪算法

利用信号光子空间分布密集而噪声光子分布相对稀疏的特点,通过密度聚类算法如贝叶斯、DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)、OPTICS (Ordering Points To Identify the Clustering Structure) 等,直接将光子点云分类为噪声光子点和信号光子点^[16-20]。其中,基于贝叶斯决策理论的光子点云去噪算法在地形复杂地区表现更好,但是需要预先估计原始光子数据的信噪比^[19]。基于 DBSCAN 的去噪算法原理简单,但在地形复杂区域表现不佳,并且对输入参数敏感^[16]。为此,Zhu 等提出了基于 OPTICS 的光子点云去噪算法,大大降低了输入参数的敏感性,而且提高了算法的自适应性^[18],特别是在强背景噪声和复杂地形区域表现良好,但能否用于大区域还需进一步测试。

(3) 基于局部统计参数的去噪算法

通过计算光子点云的一系列局部统计参数(高程、点密度、特征向量等)及其分布特征(如直方图)设置参数阈值进而实现信号与噪声的分离^[13, 21-25]。总体来说,该方法适用于多种地形环境,但去噪效果取决于阈值,而阈值又受到坡度、地表类型、点云密度、统计范围等因素影响。如何提高阈值选取的自适应性,仍需进一步研究。

2.2 光子分类

目前光子点云分类研究主要针对森林区域,即识别地面光子点和森林冠层顶部光子点。

在地面光子点提取方面,已有算法通常将所有信号点在沿轨方向划分为不同的窗口,并将每个窗口对应的最低高程点^[11]或者高程分位数范围内的点作为地面光子点^[13, 20-21],但在复杂地形或密集林区,提取的地面光子点通常包含非地面点,如近地面光子点或植被冠层点。Zhu 等将光子数据高程频率直方图最低高程峰值处的最大密度光子点作为初始地面点,并利用经验模态分解算法剔除初始地面点中的伪地面点如噪声点和冠层光子点,最后利用三次样条曲线拟合获取所有的地面点^[25]。该方法可以降低残余噪声

点的影响,提高复杂地形条件下地面光子点提取精度。

在冠层顶部光子点提取方面,已有算法通常将每个窗口对应的最大高程点或者高程分位数范围内的点(如 95% 百分位等)作为冠层顶部光子点^[11, 13, 20, 21-25]。此外,针对白天和晚上光子数据,有些研究分别采用了不同的高程分位数范围^[20, 25]。但是冠层顶部光子点对应的高程百分位范围受地形、信噪比、地表类型等影响,如何自适应性选取最佳高程分位数范围有待进一步研究。

3 光子数据应用进展

不同于 ICESat-1/GLAS, ICESat-2/ATLAS 数据光斑更小、密度更高,获取的地表信息更精细,已用于冰盖高程测量、海冰厚度反演、陆地高程测量、森林生物量估算以及湖泊水位监测等领域。此外,通过多期数据或联合其他遥感数据,可以动态监测冰川/冰盖、森林生物量以及湖泊水位变化等。

3.1 冰盖高程测量及变化监测

监测冰盖变化对定量评估当前和未来海平面变化至关重要,ICESat-2 重复周期为 91 天,可以估计冰盖高度短期变化,联合其他多源数据,还可以监测冰盖高度长时间变化。

在冰盖高程和坡度测量方面,Smith 等详细阐述了通过 ATL03 产品生成冰盖高程 ATL06 产品的算法原理和应用,同时测试了该算法在不同冰盖表面和云条件下的性能^[26]。Brunt 等验证了 2018 年 10 月~2019 年 4 月期间 ATL03 和 ATL06 产品获取的冰盖高程准确度和精度^[27],结果表明,ATL03 产品提取的冰盖高程准确度优于 5 cm,精度优于 13 cm; ATL06 产品获取的冰盖高程准确度优于 3 cm,精度优于 9 cm。利用 ICESat-2 强波束和弱波束可以估算冰盖坡度信息。Brunt 等以格林兰岛为例,利用 MABEL 数据估算冰盖坡度^[28],与 ATM (Airborne Topographic Mapper) 测定的坡度相比,MABEL 数据估计的坡度平均误差小于 $<0.05^\circ$ 。

在冰盖变化信息监测方面,Smith 等利用 2003 年 ICESat 和 2019 年 ICESat-2 数据(图 3)量化全球冰盖和海平面变化^[29]。结果表明,格陵兰岛和南极洲的冰盖损失分别为 $200 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $118 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,导致 2003~2019 年间海平面上升约 14 mm,其中从西南极洲冰架流失

的冰块占该地区总量的 30% 以上。与单独使用 ICESat 数据进行冰盖变化监测相比, 利用长时间序列 ICESat-2 和 ICESat 数据减少了由于测量误差和偏差

引起的不确定性, 降低了地表质量平衡短期变化的影响, 比十年以下的研究更能清楚地反映冰盖长期变化。

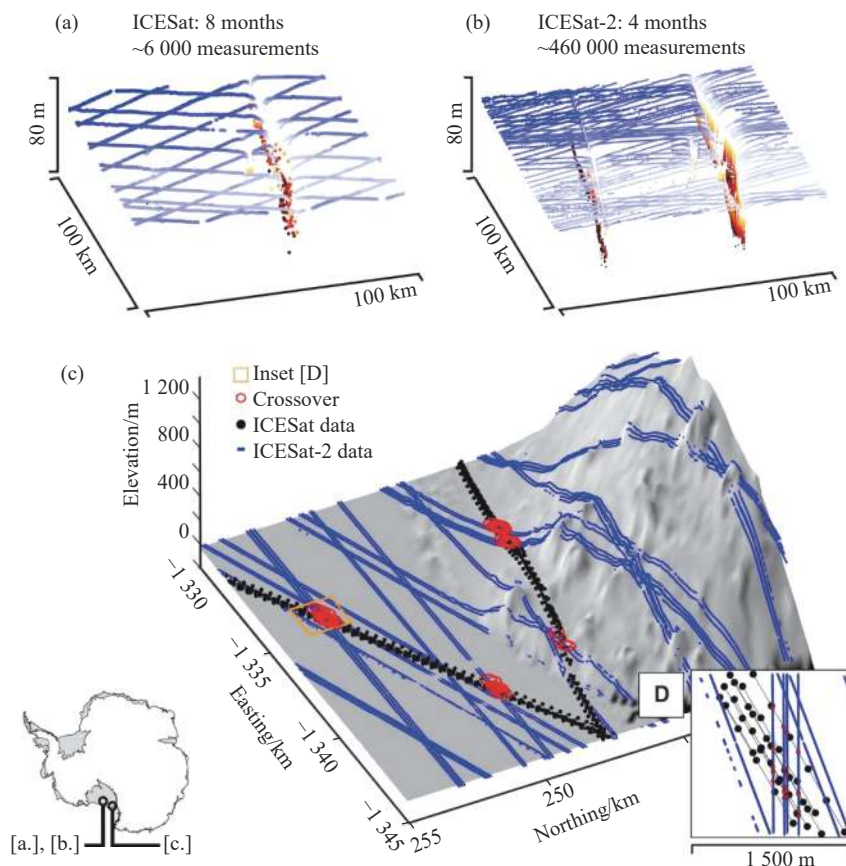


图 3 ICESat 和 ICESat-2 数据在冰盖区域分布情况^[29]

Fig.3 Distribution of ICESat and ICESat-2 data in ice sheet^[29]

南极冰架的加速损失会引发陆地冰盖接地线处冰流量的增加, 从而加速全球海平面上升。其中, 冰流量估算对接地线的假定位置极为敏感, 因此需要准确测量接地线位置以估算冰盖质量平衡。Li 等提出了利用 ATLAS 数据绘制南极冰盖接地线的方法^[30], 估算的接地线平均绝对分离距离和标准偏差分别为 0.29 km 和 0.31 km; 相对于 GLAS, ATLAS 在空间和时间上可以提供更高精度和密度的接地线测量, 其观测南极接地线次数增加了 2 倍。

3.2 海冰高程测量及厚度反演

海冰不仅是极地海洋如何应对气候变暖的重要指标, 而且可预测未来极地海洋的变化。在海冰区域, 仅有大约 1/10 的海冰厚度在海平面以上, 海冰干舷测量的小误差会导致海冰厚度估算时的大误差, 因此精确测量海冰干舷至关重要。ATLAS 为沿条带连

续的剖面数据, 可以更好地测量海冰区域的海面高度和周围海冰高度, 确定海冰干舷并估算海冰厚度。

已有研究验证了 ATLAS 提取海冰高程和海冰干舷厚度精度, 表明 ATL07 测量高程精度约为 2 cm, 提取的海冰高程与 ATM 数据接近一致, 相关性在 0.95 和 0.97 之间, 平均回归斜率在 0.93 和 0.99 之间, 海冰干舷估算误差为 2~4 cm^[31-32]。利用浮力定律可将海冰干舷转换为海冰厚度, Petty 等提出了一种将海冰干舷产品 (ATL10) 转换为海冰厚度的方法, 并制作了 2018.10~2019.04 期间月平均网格化 (25 km×25 km) 海冰厚度产品, 与 2008 年 ICESat 估算的海冰厚度相比, ATLAS 数据估算的海冰厚度变薄了约 0.37 m^[33]。

ICESat-2 激光束不会穿透海冰顶部的雪层 (图 4), 可用于提取准确的海冰总干舷厚度 (h_t), 而 CryoSat-2 等雷达波由于自身的穿透性, 可以测量海冰干舷

(h_{fi}), 二者结合可以估算积雪厚度。Kwok 等利用 ICESat-2 和 CryoSat-2 数据估算了北极积雪厚度^[34], 结果表明, 2018 年 10 月~2019 年 4 月期间北冰洋平均积雪厚度范围为 8~19 cm。

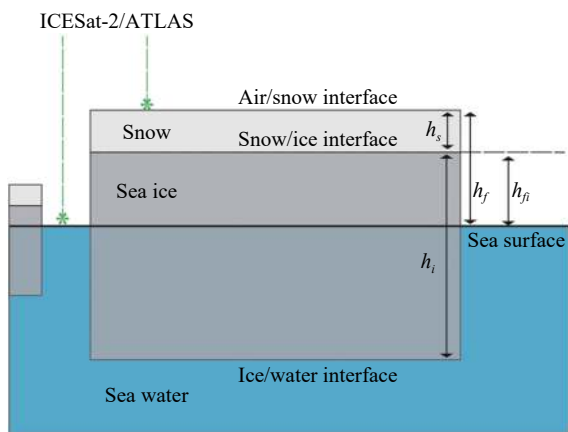


图 4 积雪覆盖的海冰示意图^[34]

Fig.4 Schematic of a snow-covered sea ice^[34]

3.3 陆地高程测量和森林探测

精确测定森林三维结构可以极大提高森林碳循环参数的估算精度, 减少森林碳储量的不确定性。ICESat-2/ATLAS 可以同时获取森林冠层和地面信息, 从而实现地面高程、森林高度、覆盖度和生物量等高精度提取, 其小光斑和高采样密度特点为高分辨率森林参数反演与制图提供了可能。

在地面高程提取方面, Dandabathula 等利用差分全球定位系统(DGPS) 测点定量评价 ICESat-2 ATL08 产品的最佳拟合地面高程精度^[35], 结果表明, 在地形平坦区域, ATL08 强信号提取的地面高程 RMSE 优于 12 cm。Neuenschwander 等以芬兰站点为实验区验证了 ATL08 产品提取的地面高程精度^[36], 平均高程误差低于 0.5 m, 均方根误差 RMSE 为 0.85 m, 研究结果还表明 ATL08 数据的地理定位(水平精度)的偏移量为 5 m, 符合任务要求的 6.5 m; Wang 等以美国阿拉斯加州为实验区, 验证了三种不同地表覆盖类型下(森林、苔原和裸地)的地面高程精度^[37], 平均偏差分别为 -0.64 m、-0.61 m 和 -0.59 m, RMSE 分别为 1.89 m、2.05 m 和 1.76 m。该研究还分析了多种因素(如坡度、信噪比、植被高度和植被覆盖度)对地面高程提取精度的影响, 其中坡度和信噪比是主要影响因素。此外, 在地形复杂区域, 光子点的定位误差也是引起

光子数据地面高程误差的一个重要因素^[8], 其中当定位误差为 5 m、坡度为 5° 时, 地面高程误差达到 0.44 m。

在森林高度提取方面, 已有研究实现了小区域森林高度提取和空间连续分布的森林高度制图。Neuenschwander 等验证了 ATL08 产品提取的森林高度精度, RMSE 为 3.2 m^[36]; Zhu 等探索了多种因素对 MABEL 数据提取的森林高度精度的影响, 当信噪比 >6、坡度 <25° 和冠层光子密度在 40~170 范围时, MABEL 数据提取的森林高度精度相对较高, 其中 R^2 为 0.70, RMSE 为 4.31 m^[38]; Li 等验证了不同空间尺度条件下 ATL08 提取冠层高度精度, 表明空间尺度为 250 m 时精度最高, 其中皮尔逊相关系数为 0.82, RMSE 为 1.95 m^[39]。ICESat-2 数据获取的森林高度空间分布不连续, 已有研究通过联合 Landsat-8、Sentinel 等光学遥感数据, 利用机器学习方法建立外推模型, 实现了 30 m 分辨率森林高度制图^[38-39]。

在森林地上生物量(Aboveground Biomass, AGB) 方面, 已有研究利用 ATLAS 数据进行了 AGB 估算和空间连续分布制图。Narine 等利用线性回归模型建立了光子数据特征参数和实测 AGB 的关系^[40]; 在此基础上, 通过联合 ATLAS 估算 AGB 与 Landsat-8 等光学遥感数据, 利用机器学习方法建立 AGB 外推模型, 实现了 30 m 分辨率 AGB 制图^[41-42]。

除了森林高度和生物量, ICESat-2/ATLAS 还可用于估算森林覆盖度。Narine 等利用线性回归模型建立了机载模拟 ICESat-2 数据特征参数和森林覆盖度的关系^[40]。此外, ATL08 产品还被应用于火灾区域分类(燃烧区和未燃烧区)^[43], 通过建立 ATL08 提取冠层参数与燃烧区和未燃烧区的关系模型, 继而推广到其他 ATL08 数据的火灾区域分类。

3.4 湖泊和海洋应用

湖泊水位和蓄水量、海平面变化是气候变化的有效指标, 反映了水量输入与损失之间的动态平衡。ICESat-2 采用 532 nm 波段, 可以穿透水面。在湖泊和海洋区域, 一部分 ICESat-2 光子数据在水体表面, 可用于测量湖泊水位、提取海洋表面波; 还有一部分 ICESat-2 光子穿透水体表面, 到达水体底部。通过水体表面和底部光子, 可测量湖泊深度、近海岸水深和海底参数等。

在湖泊水位和蓄水量研究方面, ICESat-2 测量的中国湖泊、水库水位相对高程误差仅 0.06 m, 与 ICESat 相比, ICESat-2 数据的湖泊覆盖和时间频率增加了 104% 和 132%, 高度测量不确定度从 0.07 m 降低到 0.02 m; 与 SARAL (Satellite for ARGos and ALtika, SARAL) 相比, 时间频率增加了 154%, 测量不确定度从 0.17 m 降到 0.02 m^[44]。Zhang 等利用 ICESat 和 ICESat-2 数据测量了 2003~2018 年青藏高原湖泊水位和蓄水量变化^[45], 其中 62 个湖泊同时被 ICESat 和 ICESat-2 数据覆盖, 水位平均升高 0.28 ± 0.03 m/年, 整个青藏高原湖泊的蓄水量大约增加 14 Gt/年。Xu 等利用 ICESat 和 ICESat-2 数据监测了 2003~2019 年澳大利亚湖泊水位变化^[46], 表明平均水位变化为 -0.046 m/年。Ma 等利用 2012 年 MABEL 和 1987~2007 年 Landsat TM

数据估算了 1987~2007 期间美国米德湖每年对应的水位和蓄水量值^[47], 结果表明, 水位和蓄水量值与实测数据结果一致, R^2 均大于 0.99, 其中水位和蓄水量年际变化的 RMSE 分别为 0.96 m 和 0.31 km^3 。

除了内陆湖泊水位和蓄水量, ICESat-2 还被用于监测南极洲和格陵兰岛消融区冰上湖泊深度 (图 5), 为理解冰川动力学提供支持。通过湖泊表面和底部光子数据, Fair 等实现了冰上湖泊探测及其深度提取^[48]。研究表明 ICESat-2 可以探测的湖泊深度达 7 m, 深度测量不确定性为 0.12~0.80 m; 该研究还发现 ATL03 产品中被标记为高置信度的信号光子往往不足以完全描述湖泊轮廓, 需同时考虑低置信度信号光子和缓冲区光子。

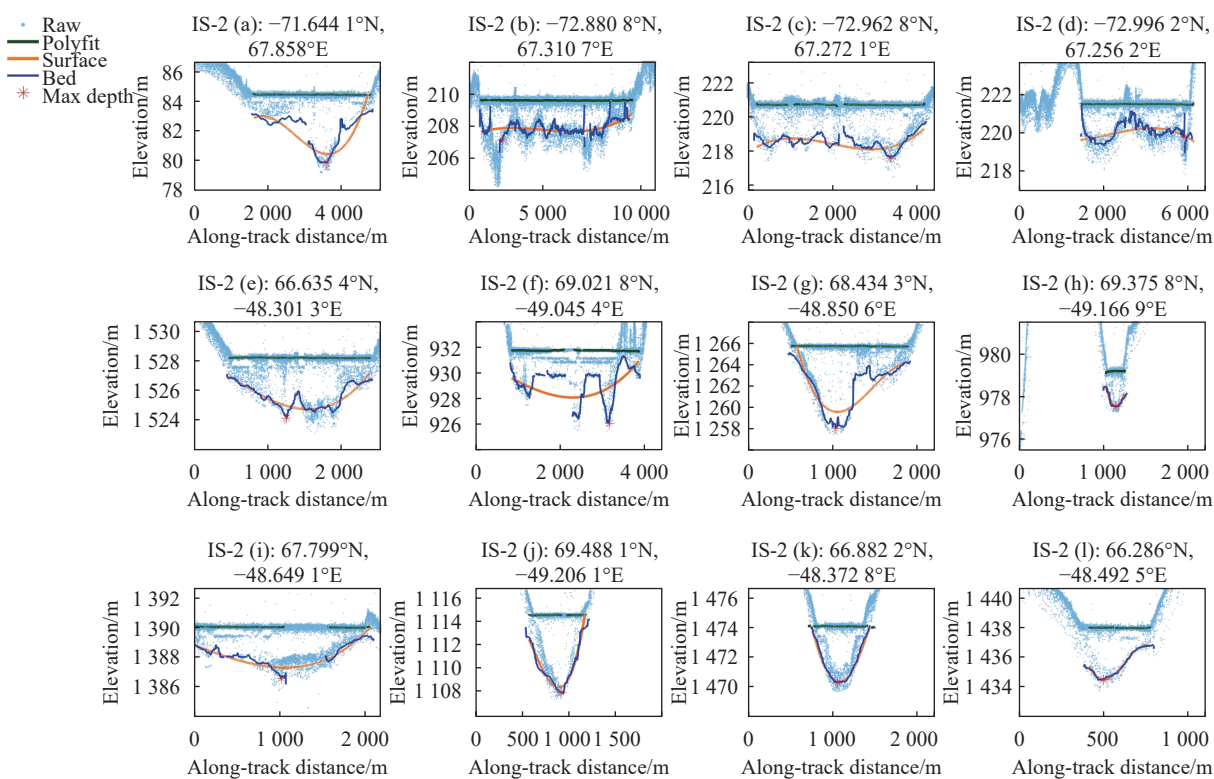


图 5 ICESat-2 探测的冰上湖泊^[48]

Fig.5 Supraglacial lakes detected by ICESat-2^[48]

除了湖泊深度, ICESat-2 还可用于测量近海岸水深。Parrish 等^[49] 验证了 ATLAS 测量水深最大可达 38 m, RMSE 为 0.43~0.60 m。Albright 和 Glennie 研究表明近海岸水深在 0~8.8 m 范围时, 其强波束和弱波束测量水深的 RMSE 范围分别为 0.26~0.34 m 和

0.20~0.31 m。此外, 联合 ICESat-2/ATLAS 和 Sentinel-2 卫星数据可实现近海岸水深反演, 其中利用线性回归算法和神经网络两种方法反演的水深 RMSE 分别为 0.14 m 和 0.69 m, R^2 分别为 0.996 和 0.93^[50]。

在海洋应用方面, ICESat-2 数据可以获取海洋表

面波特征^[51-52]、监测极地区域海洋浮游生物垂直分布状况^[53]，估算海底漫衰减系数 (diffuse attenuation coefficient, k_d) 和总后向散射系数 (total backscattering coefficients, b_b)。Horvat 等提出了一种利用 ICESat-2 数据观测海冰分布区域海洋表面波的方法，并绘制了南北半球受海浪影响的海冰区域分布图^[52]。Lu 等利用 ICESat-2 数据研究南极春季浮游生物的繁殖情况^[53]，结果表明：ICESat-2 数据可以描述海洋上层浮游植物的垂直分布情况。此外，ICESat-2 数据可以弥补 MODIS 数据无法精确估算高纬度地区海底 k_d 和 b_b 值的不足，监测海底 k_d 和 b_b 值的昼夜差异，促进极地浮游植物生物量循环研究^[54]。

4 结论与展望

星载光子计数 LiDAR 覆盖范围广，采样密度和精度高，应用广泛，是未来对地空间探测的重要发展方向。国内外学者在星载光子计数激光雷达数据处理，以及多行业应用方面取得了诸多进展，展现了该数据巨大的应用潜力。但是已有研究仍有许多不足之处，未来光子计数 LiDAR 领域的研究重点主要有以下 4 个方面：

(1) 星载光子计数激光雷达数据中存在大量的噪声点，严重影响后续应用。已有研究提出了一系列去噪与分类算法，但是在复杂地形和植被浓密覆盖情况下表现一般，无法直接应用于大区域光子点云去噪和分类。如何有效地剔除光子噪声点，提高大区域范围光子点云利用率仍是目前面临的一个巨大挑战。

(2) 地表参数的精确提取受激光特性、地形、地表覆盖等多种因素影响，如何探索地表参数与光子特征、激光特性与地形因子之间的内在联系，建立兼顾多种因素的地表参数物理反演模型，消除激光特性与地形起伏对地表参数反演精度的影响有待深入研究。

(3) ICESat-2/ATLAS 可获取全球范围离散数据，如何融合其他星载激光雷达数据 (如 GEDI, 高分七号等) 增加采样点密度，以及如何联合其他遥感数据 (如 MODIS、Landsat 和 Sentinel 数据等) 制作空间连续分布的全球高分辨率和高精度产品仍需进一步研究。

(4) 第一代星载激光雷达 ICESat/GLAS 获取了 2003~2009 年的冰川、海冰和植被区域数据，ICESat-

2/ATLAS 探测方式不同，可能会导致二者测量精度不一致。如何联合二者获取全球长时间序列地表产品，监测冰川、海冰厚度和植被变化，为全球变化等研究提供基础数据有待进一步探索。

参考文献：

- [1] Pang Yong, Li Zengyuan, Chen Bowei, et al. Status and development of spaceborne lidar application in forestry [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(3): 20-27. (in Chinese)
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): 20-27.
- [2] Ge Li, Xi Xiaohuan, Wang Cheng, et al. Research progress of ICESat-1/GLAS in lake level monitoring [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 14-19. (in Chinese)
葛莉, 习晓环, 王成. ICESat-1/GLAS数据湖泊水位监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 14-19.
- [3] Wang X, Cheng X, Gong P, et al. Earth science applications of ICESat/GLAS: a review [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23): 8837-8864.
- [4] Xu Zhe, Shu Qingtai, Yang Kaibo, et al. The Progress of forestry application based on spaceborne lidar [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2017, 44(1): 141-148. (in Chinese)
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.
- [5] Abshire J B, Sun X, Riris H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: on - orbit measurement performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21S02.
- [6] Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography [J]. *Science of Remote Sensing*, 2020, 1: 100002.
- [7] Xiao Qu. Gaofen-7 satellite [J]. *Satellite Application*, 2019(11): 22. (in Chinese)
晓曲. 高分七号卫星[J]. 卫星应用, 2019(11): 22.
- [8] 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.
- [9] Neumann T A, Martino A J, Markus T, et al. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 mission: a global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233:

- 111325.
- [10] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 247-259.
- [11] Moussavi M S, Abdalati W, Scambos T, et al. Applicability of an automatic surface detection approach to micro-pulse photon-counting lidar altimetry data: implications for canopy height retrieval from future ICESat-2 data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(13): 5263-5279.
- [12] McGill M, Markus T, Scott VS, et al. The multiple altimeter beam experimental lidar (MABEL): an airborne simulator for the ICESat-2 mission [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(2): 345-352.
- [13] Nie S, Wang C, Xi X, et al. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): A520-A540.
- [14] Chen B, Pang Y. A denoising approach for detection of canopy and ground from ICESat-2's airborne simulator data in Maryland, USA [C]//Proceedings of the AOPC 2015: Advances in Laser Technology and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [15] Magruder L A, Wharton M E, Stout K D, et al. Noise filtering techniques for photon-counting lidar data [C]//Proceedings of the Laser Radar Technology and Applications XVII. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [16] Zhang J, Kerekes J, Csatho B, et al. A clustering approach for detection of ground in micropulse photon-counting lidar altimeter data [C]//Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2014, 2014.
- [17] Huang J, Xing Y, You H, et al. Particle swarm optimization-based noise filtering algorithm for photon cloud data in forest area [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 980.
- [18] Zhu X X, Nie S, Wang C, et al. A noise removal algorithm based on OPTICS for photon-counting LiDAR data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020.
- [19] Wang X, Pan Z, Glennie C. A novel noise filtering model for photon-counting laser altimeter data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(7): 947-951.
- [20] Popescu S C, Zhou T, Nelson R, et al. Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 154-170.
- [21] Gwenzi D, Lefsky M A, Suchdeo V P, et al. Prospects of the ICESat-2 laser altimetry mission for savanna ecosystem structural studies based on airborne simulation data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 118: 68-82.
- [22] Xie F, Yang G, Shu R, et al. An adaptive directional filter for photon counting Lidar point cloud data [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 107-113. (in Chinese)
谢锋, 杨贵, 舒嵘, 等. 方向自适应的光子计数激光雷达滤波方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(1): 107-113.
- [23] Herzfeld U C, McDonald B W, Wallin B F, et al. Algorithm for detection of ground and canopy cover in micropulse photon-counting Lidar altimeter data in preparation for the ICESat-2 mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(4): 2109-2125.
- [24] Xia Shaobo, Wang Cheng, Xi Xiaohuan, et al. Point cloud filtering and tree height estimation using airborne experiment data of ICESat-2 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 1199-1207. (in Chinese)
夏少波, 王成, 刁晓环, 等. ICESat-2机载试验点云滤波及植被高度反演[J]. *遥感学报*, 2014, 18(4): 1199-1207.
- [25] Zhu X, Nie S, Wang C, et al. A ground elevation and vegetation height retrieval algorithm using micro-pulse photon-counting LiDAR data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1962.
- [26] Smith B, Fricker H A, Holschuh N, et al. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111352.
- [27] Brunt K M, Neumann T A, Smith B E. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the Antarctic ice sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13072-13078.
- [28] Brunt K M, Neumann T A, Walsh K M, et al. Determination of local slope on the Greenland Ice Sheet using a multibeam photon-counting Lidar in preparation for the ICESat-2 Mission [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11(5): 935-939.
- [29] Smith B, Fricker H A, Gardner A S, et al. Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes [J]. *Science*, 2020, 368(6496): 1239-1242.
- [30] Li T, Dawson G J, Chuter S J, et al. Mapping the antarctic grounding zone from ICESat-2 laser altimetry [C]//The Cryosphere Discussions, 2020.
- [31] Kwok R, Markus T, Kurtz N T, et al. Surface height and sea ice freeboard of the Arctic Ocean from ICESat-2: Characteristics and early results [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(10): 6942-6959.
- [32] Kwok R, Kacimi S, Markus T, et al. ICESat-2 surface height and

- sea ice freeboard assessed with ATM lidar acquisitions from operation iceBridge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11228-11236.
- [33] Petty A A, Kurtz N T, Kwok R, et al. Winter Arctic sea ice thickness from ICESat-2 freeboards [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(5): e2019JC015764.
- [34] Kwok R, Kacimi S, Webster M A, et al. Arctic snow depth and sea ice thickness from ICESat-2 and CryoSat-2 freeboards: a first examination [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(3): e2019JC016008.
- [35] Dandabathula G, Verma M, Sitiraju S R. Evaluation of best-fit terrain elevation of ICESat-2 ATL08 using DGPS surveyed points [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2020, 14(3): 285-293.
- [36] Neuenschwander A L, Magruder L A. Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1721.
- [37] Wang C, Zhu X, Nie S, et al. Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38168-38179.
- [38] Zhu X, Wang C, Nie S, et al. Mapping forest height using photon-counting LiDAR data and Landsat 8 OLI data: a case study in Virginia and North Carolina, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106287.
- [39] Li W, Niu Z, Shang R, et al. High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102163.
- [40] Narine L L, Popescu S, Neuenschwander A, et al. Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 1-11.
- [41] Narine L L, Popescu S, Zhou T, et al. Mapping forest aboveground biomass with a simulated ICESat-2 vegetation canopy product and Landsat data [J]. *Annals of Forest Research*, 2019, 62(2): 69-86.
- [42] 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.
- [43] Liu M, Popescu S, Malambo L. Feasibility of burned area mapping based on ICESAT-2 photon counting data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 24.
- [44] Yuan C, Gong P, Bai Y. Performance assessment of ICESat-2 laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 770.
- [45] Zhang G, Chen W, Xie H. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13107-13118.
- [46] Xu N, Ma Y, Zhang W, et al. Surface-water-level changes during 2003-2019 in Australia revealed by ICESat/ICESat-2 altimetry and landsat imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020: 10.1109/LGRS.2020.2996769.
- [47] Ma Y, Xu N, Sun J, et al. Estimating water levels and volumes of lakes dated back to the 1980s using Landsat imagery and photon-counting lidar datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111287.
- [48] Fair Z, Flanner M, Brunt K M, et al. Using ICESat-2 and Operation IceBridge altimetry for supraglacial lake depth retrievals [J]. *The Cryosphere Discussions*, 2020: 10.5194/tc-2020-136.
- [49] Parrish C E, Magruder L A, Neuenschwander A L, et al. Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1634.
- [50] Albright A, Glennie C. Nearshore bathymetry from fusion of Sentinel-2 and ICESat-2 observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020: 10.1109/LGRS.2020.2987778.
- [51] Klotz B W, Neuenschwander A, Magruder L A. High-resolution ocean wave and wind characteristics determined by the ICESat-2 land surface algorithm [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(1): e2019GL085907.
- [52] Horvat C, Blanchard-Wrigglesworth E, Petty A. Observing waves in sea ice with ICESat-2 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(10): e2020GL087629.
- [53] Lu X, Hu Y, Yang Y. Ocean Subsurface study from ICESat-2 mission [C]//In Proceedings of Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall. PIERS 2019, 2019.
- [54] Lu X, Hu Y, Yang Y, et al. Antarctic spring ice-edge blooms observed from space by ICESat-2 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111827.