

ICESat-2 植被冠层高度和地表高程数据产品用于森林高度提取的效果评价

董佳臣^{1,2}, 倪文俭¹, 张志玉¹, 孙国清^{1,3}

1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;

3. 美国马里兰大学地理系 马里兰州 College Park, 美国 20742

摘要: 由美国宇航局 (NASA) 研制的新一代冰、云和陆地高程卫星 (ICESat-2) 于 2018-09-15 发射成功, 其搭载的先进地形激光测高系统 (ATLAS) 采用微脉冲多波束光子计数激光雷达技术, 可用于全球高程线采样数据的获取。目前公开发布了 9 种数据产品, 其中包括植被冠层高度和地表高程数据产品 (ATL08), 为全球森林结构参数的估算提供了新的契机。本文以美国宾夕法尼亚州斯奈德县和印度尼西亚西加里曼丹吉打邦为研究区, 在温带森林和热带雨林两种不同的生态系统立地条件下, 对 ICESat-2 的 ATL08 数据产品用于森林高度估算的效果进行评价。首先建立了地形高程数据产品 (ATL03) 与 ATL08 数据产品的关联规则, 以获取分别记录在这两种产品中的光子空间分布信息和分类信息; 进而以机载小光斑激光雷达数据为参考, 对 ATL08 数据产品的光子分类可靠性及其用于森林高度估算的准确性进行了分析评价。结果表明: (1) 在温带森林情况下, ATL08 数据产品提供的平均冠层高度和最大冠层高度与参考数据的相关系数 (R^2) 分别为 0.54 和 0.61, 相对误差分别为 16.78% 和 10.71%, 表明 ATL08 数据产品的光子分类结果能够用于刻画森林冠层结构和林下地形; (2) 在热带雨林情况下, 到达地面的光子数量相较于温带森林明显减少, 地面光子类型识别的可靠性低, ATL08 数据产品提供的平均冠层高度和最大冠层高度与参考数据的相关系数 (R^2) 分别为 0.21 和 0.19; (3) 森林覆盖度的增大会导致 ATL08 计算的冠层高度误差增大, 热带雨林平均冠层高度的误差随着坡度增大有增大趋势, 在坡度为 0° — 10° 、 10° — 20° 和 20° — 30° 共 3 组情况下, 误差分别为 5.7 m、6.6 m 和 9.3 m。因此, 在高森林覆盖度情况下, 现有的 ATL08 数据产品难以直接用于森林高度的提取。

关键词: ICESat-2, ATLAS, ATL08, 森林结构参数

引用格式: 董佳臣, 倪文俭, 张志玉, 孙国清. 2021. ICESat-2 植被冠层高度和地表高程数据产品用于森林高度提取的效果评价. 遥感学报, 25(6): 1294-1307

Dong J C, Ni W J, Zhang Z Y and Sun G Q. 2021. Performance of ICESat-2 ATL08 product on the estimation of forest height by referencing to small footprint LiDAR data. National Remote Sensing Bulletin, 25(6): 1294-1307 [DOI: 10.11834/jrs.20219449]

1 引言

森林结构参数 (如植被高度、生物量、水平和垂直分布等) 是林区碳循环、水循环以及辐射传输过程的重要影响因素 (Gaumont-Guay 等, 2014)。激光雷达因其能够提供有关地面目标详细的空间分布信息, 被认为是目前测量森林结构参数的最佳数据源 (Huang 等, 2013), 特别是星载激光雷达系统, 可在大空间尺度上对光斑内的森

林结构进行测量 (李增元等, 2016), 是全球变化研究的重要数据源。美国国家航空航天局 (NASA) 发射的冰、云和陆地高程卫星 (ICESat) 上搭载的地球科学激光高度计系统 (GLAS), 为估算全球森林结构参数做出了重要贡献 (Abdalati 等, 2010; Farrell 等, 2009; Khan 等, 2014)。ICESat-2 作为 ICESat 的后续观测计划于 2018-09-15 成功发射 (Brown 等, 2016)。它搭载了先进地形激光高度计系统 (ATLAS), 该系统采用多波束微

收稿日期: 2019-12-10; 预印本: 2020-10-20

基金项目: 战略性国际科技创新合作重点专项 (编号: 2020YFE0200800); 国家重点研发计划 (编号: 2017YFA0603002)

第一作者简介: 董佳臣, 1995 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为森林遥感。E-mail: dongjc@radi.ac.cn

通信作者简介: 倪文俭, 1982 年生, 男, 研究员, 研究方向为森林遥感。E-mail: niwj@radi.ac.cn

脉冲光子计数激光雷达技术, 利用高脉冲重复率, 可实现对地物三维结构的沿轨采样 (Magruder 和 Brunt, 2018; Markus 等, 2017)。

ATLAS 采用光子计数信号探测技术, 所获取的数据中含有地表反射的有效信号光子和大气散射等造成的背景噪声光子 (Neuenschwander 和 Pitts, 2019)。因此, 有效区分信号光子和噪声光子至关重要。在 ICESat-2 发射前, 美国宇航局研发了两种 ICESat-2 机载系统, 包括“坡度成像多极化光子计数激光雷达”(SIMPL) 和“多波束激光高度计试验系统”(MABEL), 两种系统均可获取 532 nm 和 1064 nm 两个波段的光子点云数据。通过对 MABEL 数据进行降分辨率、去噪、重采样以及添加噪声等处理模拟得到 ICESat-2 数据, 即 MATLAS 数据。国内外学者利用 SIMPL、MABEL 和 MATLAS 数据, 对光子计数激光雷达数据处理开展了一系列研究 (夏少波等, 2014; Nie 等, 2018; Popescu 等, 2018)。如李铭等 (2017) 研发了一种粗去噪和精去噪结合的噪声光子去除算法, 基于 MABEL 的 532 nm 波段数据的实验结果表明, 该算法去噪精度为 93.18%; Neuenschwander 和 Pitts (2019) 以有效信号相对于背景噪声分布更为聚集为依据, 提出了 DRAGANN (Differential, Regressive, and Gaussian Adaptive Nearest Neighbor) 背景噪声光子去除算法。当前针对机载光子计数激光雷达数据的数据去噪已经有了较好的方法, 但其用于 ICESat-2 数据中的效果还有待验证。

利用所识别的有效信号光子数据提取森林结构参数, 是目前光子计数激光雷达的另一研究热点。Chen 等 (2019) 评价了利用 SIMPL 数据计算的高度指数进行森林结构参数估算的潜力。结果表明, 光子计数激光雷达数据与机载小光斑 LiDAR 数据计算的森林结构参数之间具有较好的一致性, 估算的平均树高和森林覆盖率与参考数据的相关系数 (R^2) 分别为 0.54 和 0.6。Neuenschwander 和 Magruder (2016) 使用机载小光斑激光雷达模拟的 ATLAS 数据, 定量分析了在不同生态系统情况下, 光子计数激光雷达对于冠层高度估算的不确定性。结果表明, 尽管光子计数激光雷达数据提取的森林结构参数与机载小光斑激光雷达计算的相应指数有很好的相关性, 但存在普遍的低估现象。

基于现有的机载数据的研究结果初步表明,

光子计数激光雷达具备刻画森林垂直结构和林下地形, 并用于估算森林生物量和森林冠层覆盖度的潜力。但基于 ICESat-2 星载光子计数激光雷达数据进行全球森林结构参数提取还需深入研究, 一方面, 现有研究提出的数据处理算法在局部试验区内取得了较好的效果, 在全球不同区域的处理效果有待进一步检验; 另一方面, 尽管 SIMPL 和 MABEL 的激光器配置模仿了 ATLAS, 但仍与星载系统存在着显著差异, 如 MABEL 激光光斑直径为 2 m, 间距为 4 cm, 而 ATLAS 激光光斑直径为 17 m, 间距为 70 cm, 导致两者获取的光子点云密度存在差异 (Brunt 等, 2016)。目前 NASA 已经发布了 9 种 ICESat-2 全球数据产品, 其中包括植被冠层高度和地表高程数据 (ATL08)。本文旨在以机载小光斑激光雷达数据为参考, 对 ICESat-2 的 ATL08 数据产品质量及其用于森林结构参数提取的可靠性进行评价。

2 研究区与数据

2.1 研究区

为对不同地形、森林类型和覆盖度条件下的 ICESat-2 数据产品进行评价, 结合机载小光斑激光雷达数据的可获取情况, 本文选择美国宾夕法尼亚州斯奈德县 (40°42'N, 77°14'W) 和印度尼西亚加里曼丹吉打邦 (1°25'S, 111°8'E) 作为研究区。它们的地表覆盖情况如图 1 所示。斯奈德县位于宾夕法尼亚州中部的阿巴拉契亚山区, 海拔范围为 180—640 m。该区域属于温带大陆性湿润气候, 主要植被类型为北方硬木林, 主要树种有糖枫、山毛榉、栲、桦、红栎和白栎。吉打邦位于加里曼丹岛西南部, 属于热带雨林气候, 植被类型主要包括泥炭沼泽林、河岸森林以及季节性湿地, 森林覆盖度超过 60%, 林下地形缓坡居多, 海拔范围为 80 m 到 550 m (Manuri 等, 2017)。

2.2 ICESat-2 数据

2.2.1 ICESat-2 数据获取模式

图 2 (a) 展示了 ICESat-2 数据获取模式。搭载在 ICESat-2 上的 ATLAS 系统以 10 kHz 的重复频率发射单个激光波束, 通过衍射光学元件将其分成 3 个激光波束对, 每个波束对由一个强波束和一个弱波束组成, 强弱波束能量比为 4:1。强弱波束

对在地面形成3组共6列相互平行的地面轨迹。每组波束对在与地面轨迹垂直方向间距约为3 km，每组波束对内同时发射的强弱光斑在与地面轨迹垂直

方向间距约为90 m，沿轨方向的间距约为2.5 km；地面光斑直径约为17 m，每沿轨移动0.7 m获取一个光斑的数据，如图2（b）所示。

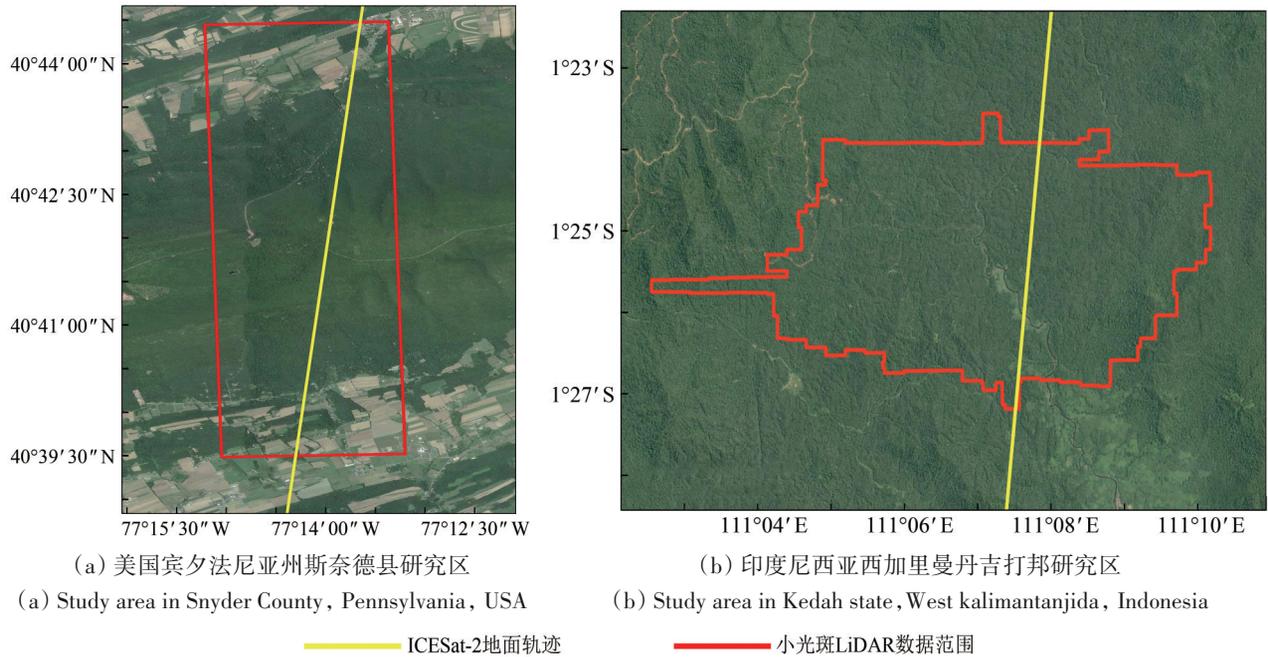


图1 研究区范围与地表覆盖(背景图来源于 Google Earth™)
Fig.1 Study sites and surface coverage (Background image from Google Earth™)

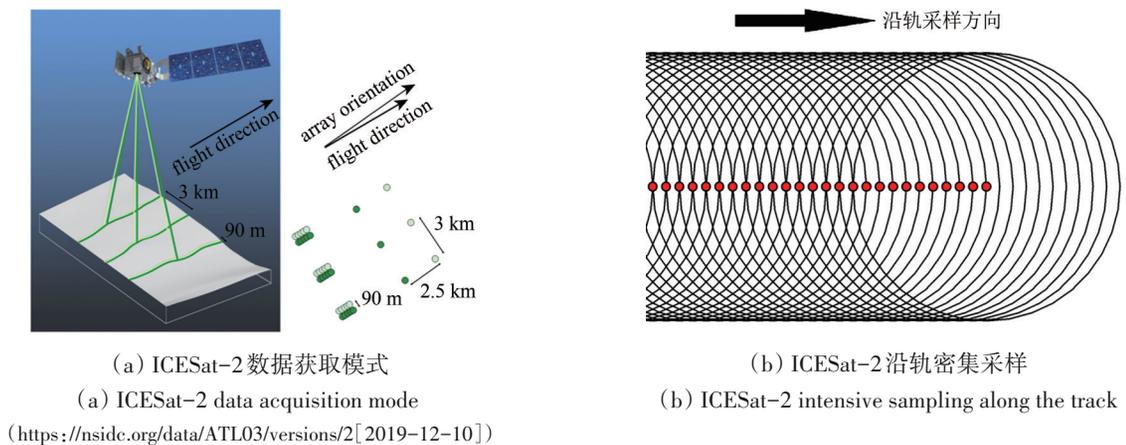


图2 ICESat-2数据获取模式
Fig.2 ICESat-2 data acquisition mode

2.2.2 ICESat-2数据产品

根据美国国家冰雪数据中心给出的定义，ICESat-2共有21种产品，分别命名为ATL01~ATL21。目前采用hdf5文件格式公开发布了其中的9种数据产品，产品编号、时空范围、时间范围、空间分辨率以及时间分辨率等参数详细信息参见(<https://nsidc.org/data/ICESat-2/data-sets>[2020-06-09])。

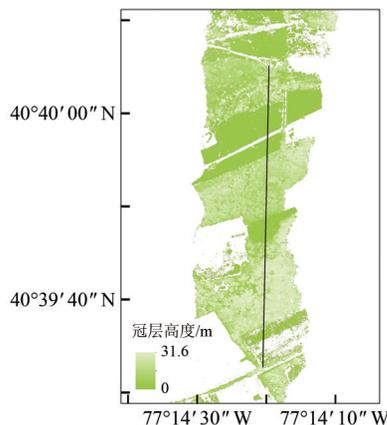
ATL08 植被冠层高度和地表高程数据 (Canopy Height, Terrain Elevation) 是发布产品之一，其空间分辨率为100 m，数据覆盖全球，本文主要对ATL08提供的植被冠层高度和地表高程数据质量进行评价。ATL03地形高程数据 (Terrain Elevation) 提供了每个光子的经度、纬度、高程和时间，其空间分辨率为70 cm，时间分辨率为91 d，数据覆盖全球。由ICESat-2数据获取模式可知，

ATLAS发射的强弱波束对在地面形成3组共6列相互平行的地面轨迹,ATL03和ATL08数据产品将地面轨迹从左至右依次进行编号,并根据地面轨迹编号组织数据,其中GT1L和GT1R构成第1组,GT2L和GT2R构成第2组,GT3L和GT3R构成第3组。ATL08是在ATL03数据的基础上,采用DRAGANN算法首先去除背景噪声光子,然后对有效信号光子进行分类。ATL08产品中包括ATL03中光子的分类标识(噪声、地面、植被和冠顶)和每100 m统计单元的陆地和植被参数,其中陆地参数包括在每100 m统计单元内标记为地面光子的高程平均值,最小值,最大值,中值和标准偏差;冠层参数包括在每100 m集合内标记为植被和冠顶的光子相对于地面的高度平均值,最小值,最大值和中值高度,以及植被冠层光子垂直分布的分位数高度指数(RH25, RH50, RH60, RH70, RH75, RH80, RH85, RH90和RH95)。

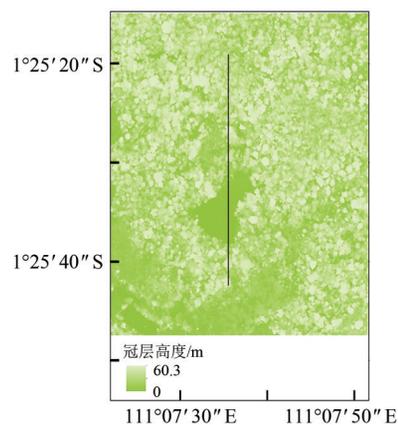
本研究在斯奈德县研究区使用的是获取于2019-02-06的ATL03_20190206031650_06060206_001_01.h5和ATL08_20190206031650_06060206_001_01.h5数据,其中所用到的弱波束地面轨迹编号为GT3R,强波束地面轨迹编号为GT3L;在吉打邦研究区使用的是获取于2019-04-17的ATL03_20190417111921_02930308_001_01.h5和ATL08_20190417111921_02930308_001_01.h5数据,其中所用到的弱波束地面轨迹编号为GT1R,强波束地面轨迹编号为GT1L。图1中的黄色直线给出了研究中所用到数据的地面轨迹。

2.3 小光斑激光雷达数据

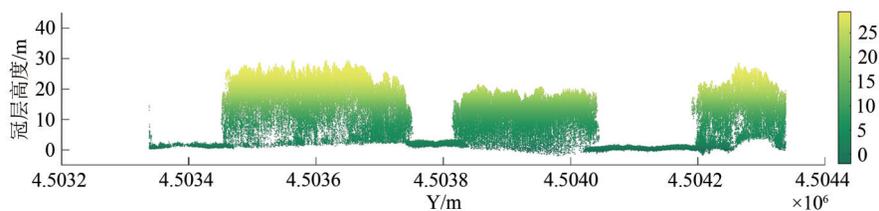
小光斑激光雷达数据对森林空间结构和林下地形的探测能力已得到广泛认可(Lu等,2016;Ma等,2017)。本研究以小光斑激光雷达数据为参考数据,对ICESat-2数据产品进行评价。在斯奈德县研究区,采用的是美国宇航局利用其机载系统G-LiHT于2011-08获取的激光雷达数据(Cook等,2013)。它采用的是RiegI激光测量系统(VQ-480),工作波长为1550 nm,脉冲重复频率为150 kHz,点云密度为10点/m²,发布的产品包括经过滤波后的点云、空间分辨率为1 m的冠层高度模型CHM(Canopy Height Model)、数字地表模型DTM(Digital Terrain Model)以及数字表面模型DSM(Digital Surface Model)。图1(a)红色矩形给出了该数据的空间覆盖范围,覆盖面积约为30 ha。在吉打邦研究区,使用的是雅加达PT Surtech Prima公司于2014-10-12通过Optech ORION M300系统获取的数据,其点云密度超过40点/m²(Melendy等,2018)。Earthdata官网中公布的数据包括点云数据、空间分辨率为1 m的DSM以及DTM。图1(b)红色多边形标示出了小光斑激光雷达数据覆盖范围,约为2960 ha。研究区所用到的小光斑激光雷达的部分CHM图以及对应的点云剖面(长1000 m,宽50 m)如图3所示,其中黑色线对应于小光斑激光雷达点云剖面位置。从图3可以看出,实验所用到的小光斑激光雷达点云密度大,能够揭示森林垂直结构以及林下地形。



(a) 温带森林部分CHM图
(a) CHM in temperate forest

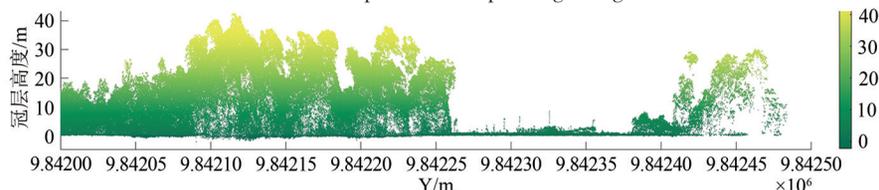


(b) 热带雨林部分CHM图
(b) CHM in tropical rainforest



(c) 对应于图1(a)的点云剖面

(c) Point cloud profile corresponding to Fig.1(a)



(d) 对应于图1(b)的点云剖面

(d) Point cloud profile corresponding to Fig.1(b)

图3 小光斑激光雷达CHM图以及点云剖面图

Fig.3 CHM and point cloud profile of small-footprint Lidar

3 分析方法

3.1 ATL03与ATL08关联

ATL08产品给出了沿轨方向每100 m内植被冠层光子垂直分布的分位数高度指数。其用于森林结构参数估算的效果取决于两个方面,包括:(1)光子计数激光雷达的探测能力;(2)光子数据处理算法的性能,即噪音光子识别算法和植被与地面光子分离算法的处理效果。为了分析ATL08产品分位数高度指数的可靠性,需要深入分析其对应的光子空间分布和分类信息。光子空间分布信息存储于ATL03产品中。ATL08产品记录了用于计算分位数高度指数的光子分类信息,但没有空间分布信息。因此,需要将ATL03产品与ATL08进行关联,以同时得到光子的空间分布和分类信息。两者的具体关联规则如下:

(1) 在ATL03中,每个光子采用两种索引方法,第1种是按照光子的GPS时间顺序依次编号,称为光子序号(即Group: /gtx/heights的记录顺序);第2种是对光子进行分组,按沿轨距离每20 m分为一组,对各组依次进行编号,称为组号(存于Group: /geolocation/segment_id内),并记录每组起始的光子序号(存于Group: /geolocation/ph_index_beg内)。

(2) 在ATL08中,按沿轨距离约每100 m为一个统计单元,每个统计单元内的光子采用ATL03的第2种索引方法进行记录,每个光子由所在的组号

(存于Group: /gtx/signal_photons/ph_segment_id内)和组内的相对序号来记录(存于Group: /gtx/signal_photons/classed_pc_indx)。

(3) 针对ATL08中的每个光子,遍历ATL03的所有组,通过组号的匹配(ph_segment_id=segment_id),获得该组的起始光子序号(ph_index_beg),光子的相对序号与所在组的起始光子序号相加,可得到其在ATL03中光子序号,即classed_pc_indx+ph_index_beg-1。由此,可将ATL08中的每个光子与ATL03中的对应光子进行关联。从而得到每个统计单元内所有光子的空间分布和分类信息。

3.2 光子分类效果评价

利用小光斑激光雷达给出的林下地表(DTM)和冠层顶部(DSM)范围作为参考,评价ATL08产品光子的分类结果。相关数据提取的具体过程为:将每个光子信号通过地理坐标与小光斑激光雷达DTM和DSM进行匹配,得到每个光子对应的DTM值、DSM值和的GPS时间。以GPS时间为横轴,高程为纵轴,绘制ATL08光子分类结果的剖面图、林下地形剖面线和冠层表面剖面线,认为位于林下地形剖面线±1 m内的光子应为地面光子,低于林下地形剖面线或高于冠层表面剖面线1 m以上的光子为噪音光子,在林下地形剖面线与冠层表面剖面线之间的光子为冠层光子。小光斑激光雷达采用EGM96大地水准面作为高程基准,而ICESat-2使用的是WGS-84椭球面,因此在评估之前,将两者

的高程基准统一为 WGS-84 椭球面。

3.3 森林高度指数精度评价

利用小光斑激光雷达点云数据, 计算与 ATL08 产品中每 100 m 统计单元对应范围内的森林结构参数, 从而对 ATL08 产品给出的森林高度指数进行评价。将 ATL08 每个统计单元的起始和截止光子的水平连线作为中心线, 计算长 100 m 宽 17 m (即脚印直径) 的长方形的 4 个角点, 截取落在该矩形范围内的小光斑激光雷达点云数据, 利用其中的植被点云计算用作参考的森林结构参数 (平均冠层高度 (H_{mean}), 最大高度 (H_{max}), 相对高度指数 (RH25、RH50、RH60、RH75、RH80、RH85、RH90 和 RH95)), 具体定义见表 1, 具体计算方式见下列计算公式。

$$CH_i = HC_i - HD_i \quad (1)$$

$$H_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^n (CH_i) / n \quad (2)$$

$$H_{\text{max}} = \max(CH_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$DH = \text{sort}(CH) \quad (4)$$

$$RH_j = DH(i), j = 25, 50, 60, 75, 80, 85, 90, 95; \quad (5)$$

$$i = 0.01jn$$

式中, n 是小光斑激光雷达植被点总数, HC_i 是每个植被点的高程, HD_i 是每个植被点对应的林下地表高程, 即 DTM 中对应位置的高程, CH_i 为每个植被点相对于地面的高度; DH 为所有植被点相对与地面的高度按升序排列得到的数据集; i 为某个植被点在 DH 数据中的序号, j 为百分数。

表 1 森林结构参数定义

Table 1 Definition of forest structure parameters

森林结构参数	定义
平均冠层高度 (H_{mean})	集合范围内所有植被点与对应位置 DTM 差的平均值
最大冠层高度 (H_{max})	集合范围内所有植被点与对应位置 DTM 差的最大值
相对高度指数 (RH)	将集合范围内所有植被点与对应位置 DTM 差值从小到大排序, 总点数 25%、50%、60%、75%、80%、85%、90% 和 95% 位置处的高度值

为了评估 ATL08 数据产品中的平均冠层高度、最大冠层高度和相对高度指数与小光斑激光雷达提取相应指数的相关性及误差, 本文计算了相关系数 (R^2), 均方根误差 (RMSE) 以及相对 RMSE (rRMSE), 计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (6)$$

$$\text{rRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (8)$$

式中, n 是本研究中样点数量, P_i 是待评价的森林高度指数拟合值, O_i 是参考机载激光雷达估计的森林高度指数, \bar{O}_i 是小光斑激光雷达计算的相应森林高度指数的平均值。

为了评价不同森林覆盖度和地形坡度对于 ATL08 产品中森林结构参数准确性的影响, 需要利用小光斑激光雷达数据计算用于参考的森林覆盖度和地形坡度。其中森林覆盖度由 1 m 分辨率的 CHM 图计算得到, 坡度由 1 m 分辨率的 DTM 生成。类似于截取小光斑激光雷达点云数据的方法, 将 ATL08 每个统计单元的起始和截止光子的水平连线作为中心线, 计算长 100 m、宽 17 m (即脚印直径) 的长方形的 4 个角点, 截取落在该矩形范围内所有 CHM 和坡度的栅格值。联合国粮食和农业组织 (FAO) 将森林定义为面积大于 0.5 ha 以上、树木高于 5 m、林冠覆盖率超过 10%。因此两个研究区的森林覆盖度定义为所有 CHM 栅格值大于 5 m 的像元数除以总像元数。地形坡度定义为所有坡度栅格值的平均值。

4 结果分析

4.1 强弱波束光子信号对比

ATLAS 每个波束对由 1 个强波束和 1 个弱波束组成, 它们之间的能量比约为 4 : 1, 发射频率均为 10 kHz。图 4 (a) 和图 4 (b) 分别展示了温带森林同一波束对内, 弱波束和强波束接收的地表反射的光子信号; 图 4 (c) 和图 4 (d) 是热带雨林的的情况。可以看出, ICESat-2 数据在空中和地表以下均存在着明显的背景噪声光子, 但背景光子空间分布的聚集程度明显低于有效光子。图 4 (a) 共有 3177 个光子信号, 图 4 (b) 共有 16296 个光子信号, 弱波束是强波束光子信号数量的 19.5%。图 4 (c) 共有 936 个光子信号, 图 4 (d) 共有 4213 个光子信号, 弱波束是强波束光子信号数量的 22.2%。因此, 无论在温带森林还是热带森林, 强波束接收的光子信号数量明显多于弱波束, 能够更清晰完整地刻画森林结构和地形。后续分析均基于强波束接收的光子数据。

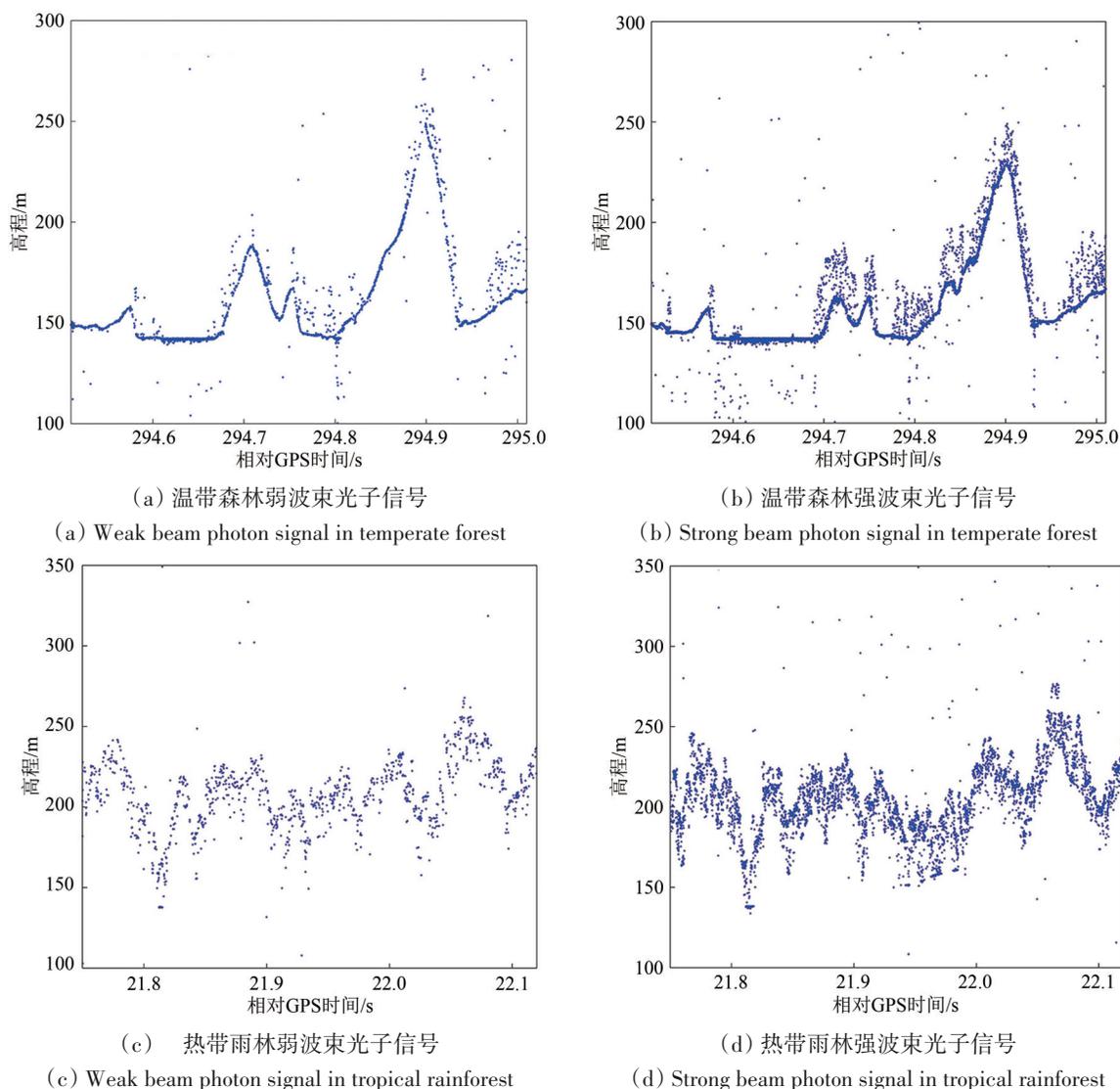


图4 强弱波束接收的光子对比

Fig.4 Comparison of strong and weak beam photon

4.2 光子分类效果评价

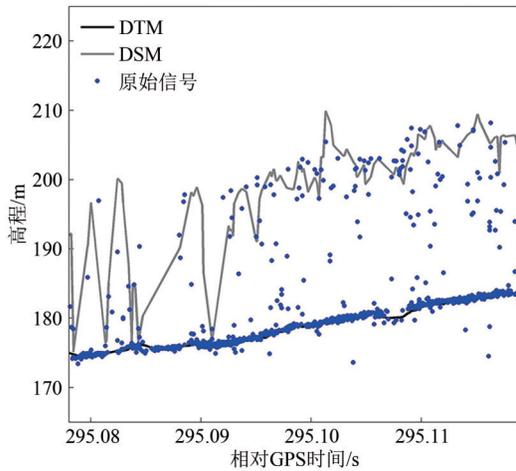
噪声光子去除和光子分类效果直接决定着利用光子数据计算森林高度指数的精度。图5展示了温带森林地区平坦(坡度为 3.7°)和陡峭(坡度为 40.7°)地形条件下,ATL03产品给出的光子空间分布和ATL08产品给出的光子分类结果。黑色线表示小光斑激光雷达提供的林下地形剖面(即DTM),灰色线表示小光斑激光雷达提供的冠层顶部剖面(即DSM)。从图5(a)和图5(b)展示的ATL03提供的未分类的光子空间分布可以看出,背景噪声光子数量较少,大量的光子位于林下地表,少部分光子位于冠层与地面之间。图5(c)和图5(d)分别展示了两种地形条件下ATL08提供的光子分类结果,其中黑色点表示噪声光子信

号,红色点线表示地面光子信号,绿色点表示植被光子信号,蓝色点表示冠顶光子信号。可以看出,明显低于地面或高于冠层的点被正确识别为噪声光子;所识别的地面光子与小光斑激光雷达揭示的林下地形剖面线基本吻合;冠层与地面之间的光子全部被识别为植被光子;在冠层顶部,对于冠层光子信号和噪声光子信号的识别存在不确定性,这会给森林最大高的提取带来误差。

图6展示了热带雨林区平坦(坡度为 5.3°)和缓坡(坡度为 15.8°)地形条件下的光子空间分布和光子分类结果。由图6(a)和图6(b)展示的ATL03提供的未分类的光子空间分布可以看出,与温带森林相似,噪声光子较少;但与温带森林不同的是,大量的光子分布在冠层顶部附近或在冠层与

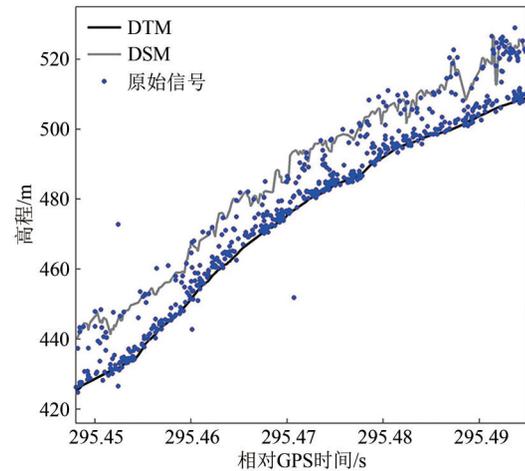
地面之间,只有少量光子位于小光斑激光雷达揭示的地面附近。图6(c)和图6(d)分别展示了两种地形条件下光子分类结果,点颜色的含义与图5一致。可以看出,与温带森林相似,ATL08产品对于明显高于冠层的噪声光子的识别效果较好,对于

冠顶光子和噪声光子的识别存在不确定性;但不同于温带森林,地面光子的识别效果较差,部分介于冠层与地面间的光子被识别为地面光子,而低于所识别地面光子的数据被识别为噪声光子。



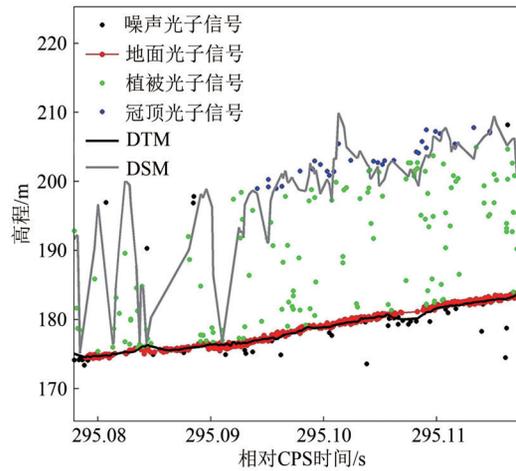
(a) 平坦地形(坡度为 3.7°)光子空间分布

(a) Photon spatial distribution at flat area (Slope= 3.7°)



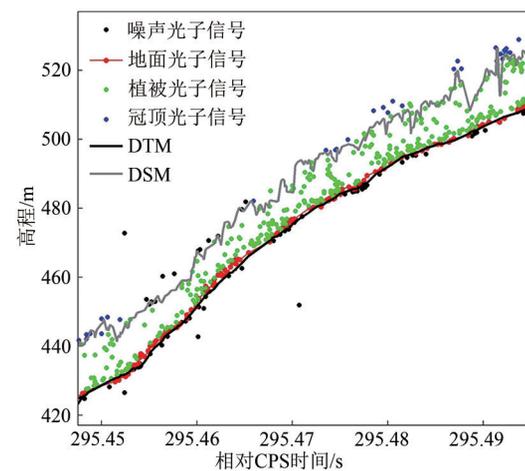
(b) 陡坡地形(坡度为 40.7°)光子空间分布

(b) Photon spatial distribution at mountainous area (Slope= 40.7°)



(c) 平坦地形(坡度为 3.7°)光子分类结果

(c) Result of photon classification at flat area (Slope= 3.7°)



(d) 陡坡地形(坡度为 40.7°)光子分类结果

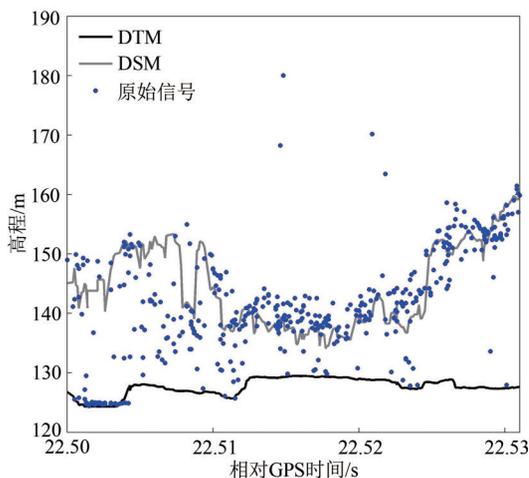
(d) Result of photon classification at mountainous area (Slope= 40.7°)

图5 温带森林区不同地形情况下光子空间分布与分类结果

Fig.5 Spatial distribution and classification results of photons under different topography in temperate forest area

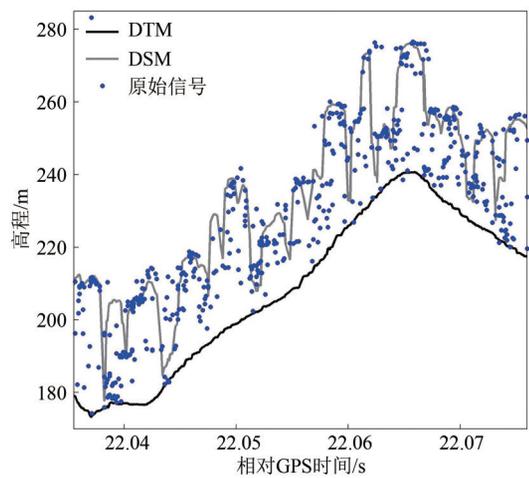
图7为不同覆盖度的热带雨林区光子空间分布与分类结果。图7(a)和图7(b)的森林覆盖度分别为61%和98%。可以看出,图7(a)中来自于地面的光子较多;而图7(b)来自于地面的光子明显减少,更多的光子主要分布在冠层顶部附近。对比图7(c)和图7(d)可以看出,在覆盖度相对较低的情况下,ATL08产品基本能捕捉到林下地形,而在覆盖度相对较高的情况下,ATL08产品识别的林下地形存在错误。尽管位于热带雨

林的小光斑激光雷达数据是于2014年获取的,但由其得到的林下地形DTM并不会随时间而变化,因此对于地面光子类型识别结果的评价不会产生影响,而地面光子识别的准确性是影响森林高度提取的关键。从光子分类效果评价中可以看出ATL08产品在热带高森林郁闭度区域光子穿透能力减弱,地面光子识别错误,这将导致热带雨林冠层高度提取出现较大误差。



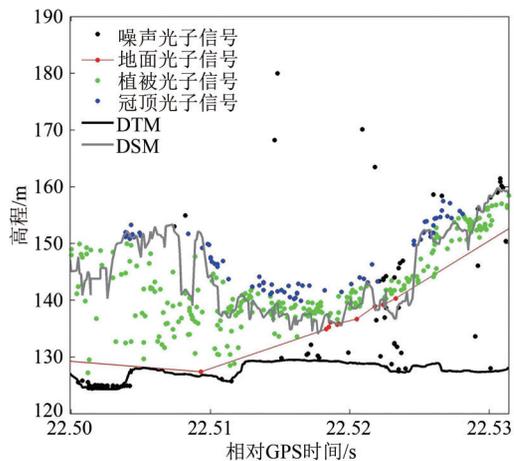
(a) 平缓地形(坡度为 5.3°)光子空间分布

(a) Photon spatial distribution at flat area (Slope = 5.3°)



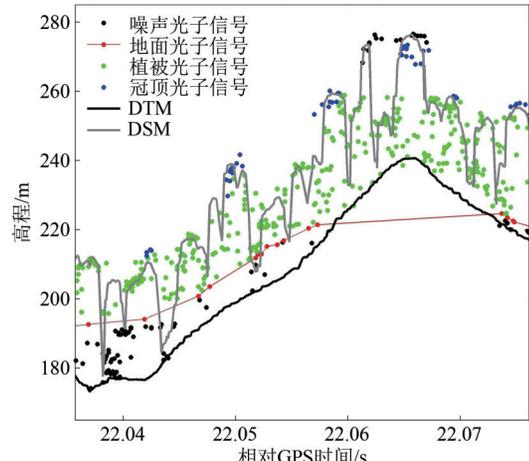
(b) 缓坡地形(坡度为 15.8°)光子空间分布

(b) Photon spatial distribution at gentle slope area (Slope = 15.8°)



(c) 平缓地形(坡度为 5.3°)光子分类结果

(c) Result of photon classification at flat area (Slope = 5.3°)

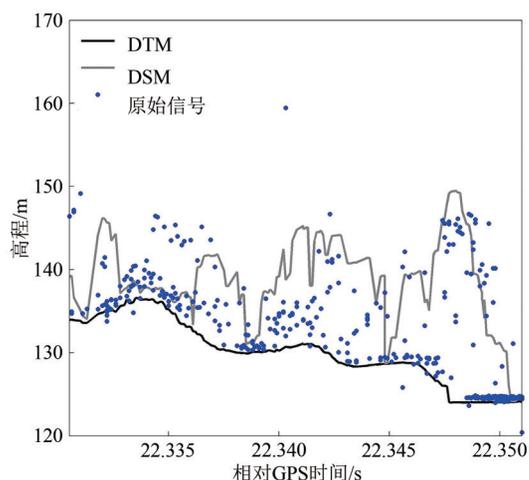


(d) 缓坡地形(坡度为 15.8°)光子分类结果

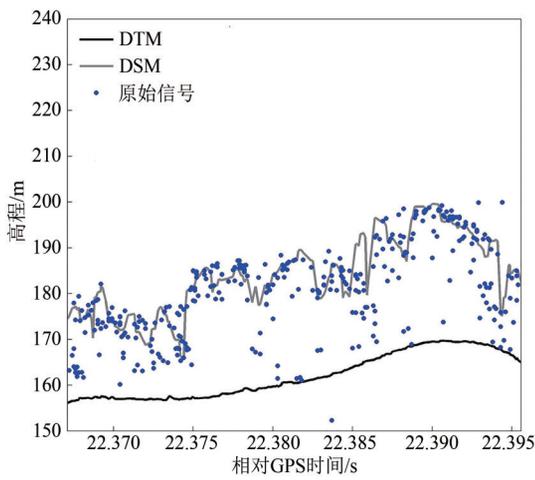
(d) Result of photon classification at gentle slope area (Slope = 15.8°)

图6 热带森林区不同地形情况下光子空间分布与分类结果

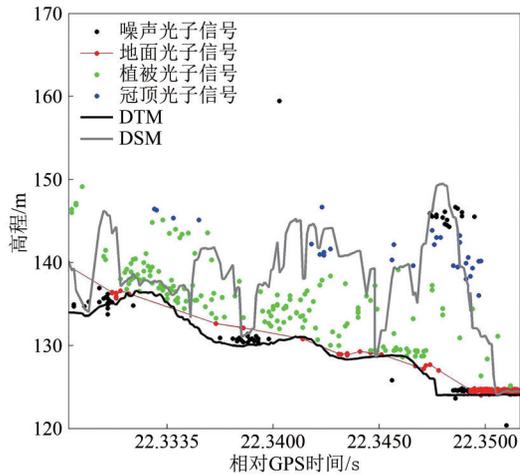
Fig. 6 Spatial distribution and classification results of photons under different topography in tropical rainforest area



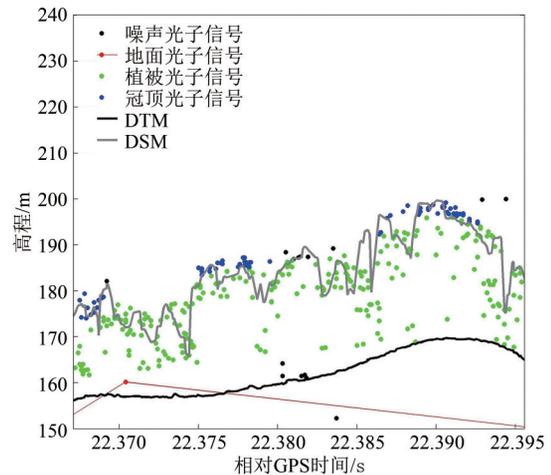
(a) 覆盖度相对低(61%)的热带雨林区光子空间分布
(a) Photon spatial distribution in tropical rainforest with relatively low canopy cover(61%)



(b) 覆盖度相对高(98%)的热带雨林区光子空间分布
(b) Photon spatial distribution in tropical rainforest with relatively high canopy cover(98%)



(c) 覆盖度相对低(61%)的热带雨林光子分类结果
(c) Result of photon classification in tropical rainforest with relatively low canopy cover(61%)



(d) 覆盖度相对高(98%)的热带雨林光子分类结果
(d) Result of photon classification in tropical rainforest with relatively high canopy cover(98%)

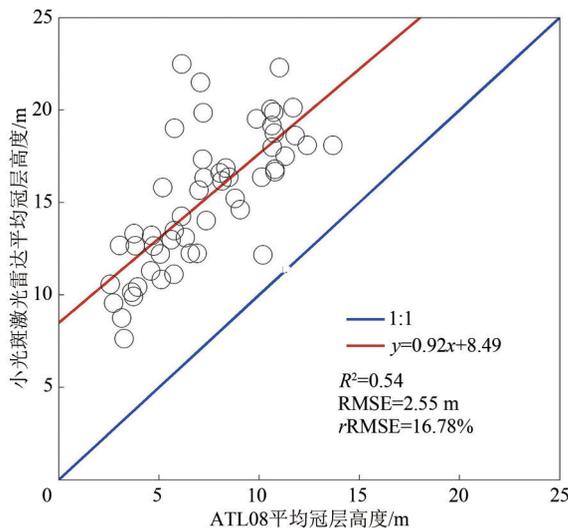
图7 热带雨林区不同森林覆盖度情况下的光子空间分布与分类结果

Fig.7 Spatial distribution and classification results of photons under different canopy cover in tropical rainforest area

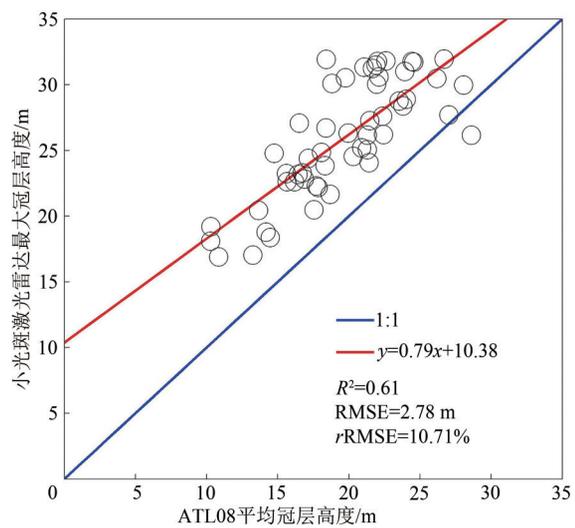
4.3 森林结构参数提取

图8 (a) 和图8 (b) 分别展示了温带森林情况下 ATL08 产品中森林平均冠层高度和最大高度与小光斑激光雷达计算相应指数的对比; 图8 (c) 和图8 (d) 分别展示了热带雨林情况下 ATL08 产品中森林平均冠层高度和最大高度与小光斑激光雷达计算相应指数的对比。图中蓝色线表示 1 : 1 直线, 红色线为拟合线。可以看出, 在温带森林情况下, ATL08 产品中森林最大高度较为准确 ($R^2=0.61$, $RMSE=2.78$ m, $rRMSE=10.71%$), 平均高度结果相

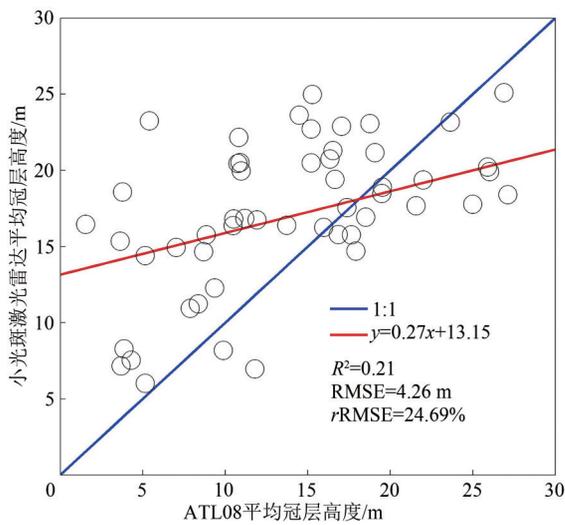
对较差 ($R^2=0.54$, $RMSE=2.55$ m, $rRMSE=16.78%$), 且 ATL08 产品普遍低估温带森林的平均冠层高度和最大高度。在热带雨林的情况下, 其结果明显比温带森林要差, ATL08 平均冠层高度与小光斑计算结果的相关系数为 $R^2=0.21$, $RMSE=4.26$ m, $rRMSE=24.69%$, ATL08 最大冠层高度与小光斑计算结果的相关系数为 $R^2=0.19$, $RMSE=6.35$ m, $rRMSE=15.75%$ 。ATL08 产品会严重高估或低估某些集合内热带雨林的冠层高度。



(a) 温带森林平均冠层高度结果
(a) Result of mean canopy height in temperate forest

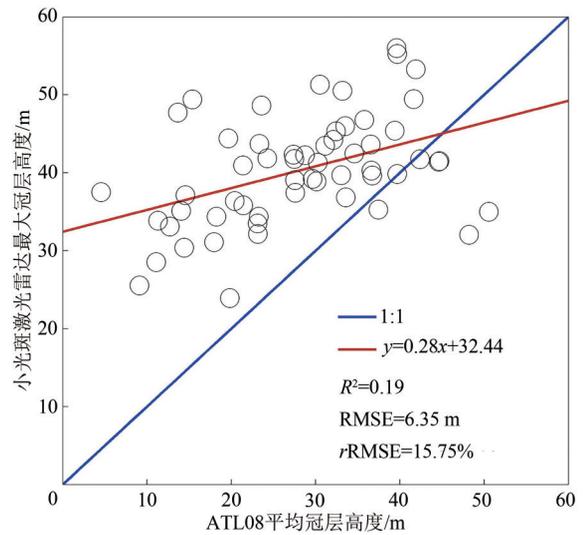


(b) 温带森林最大高度结果
(b) Result of max forest height in temperate forest



(c) 热带雨林平均冠层高度结果

(c) Result of mean canopy height in tropical rainforest



(d) 热带雨林最大高度结果

(d) Result of max forest height in tropical rainforest

图8 森林平均冠层高度、最大高度与小光斑激光雷达相应计算结果的对比

Fig.8 Comparison of mean forest canopy height, max forest height with small-footprint LiDAR's corresponding calculation

图9展示了在不同森林生态系统条件下，ATL08产品中RH25、RH50、RH60、RH75、RH80、RH85、RH90和RH95冠层高度指数与小光斑激光雷达计算相应指数的相关性，其中黑色代表温带，红色代表热带，正方形表示 R^2 ，圆形表示RMSE。结果表明除RH25，温带其他百分位高度指数与小光斑激光雷达计算结果的相关性均高于热带；温带高度指数的 R^2 随着高度指数百分位的增大而逐渐增大，且所有温带百分位的高度指数的 $rRMSE$ 均小于热带的 $rRMSE$ 。其中RH90和RH95与小光斑激光雷达计算的结果相关性较高， R^2 均为0.69， $rRMSE$ 分别等于11.01%和10.72%，ICESat-2数据能够较好地刻画温带森林上层结构。而热带高度指数计算结果普遍较差，RH95的 R^2 最高，仅为0.23， $rRMSE=18.51\%$ 。

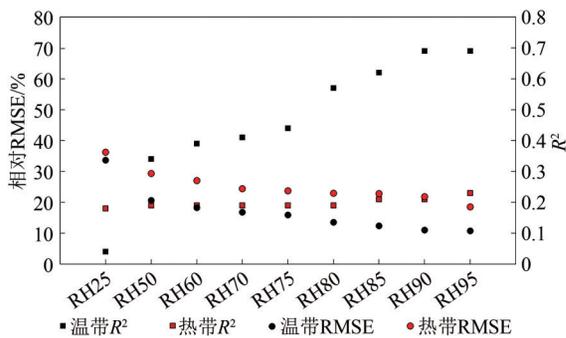


图9 ATL08不同百分比高度指数与小光斑激光雷达相应计算结果的相关性

Fig.9 Dependence between ATL08 different percentage height metrics and the corresponding calculation results of small-footprint LiDAR

温带森林结果表明ATL08产品存在低估森林的结构参数的现象，这与已有研究结果相一致(Narine等, 2019; Neuenschwander和Pitts, 2019; Neuenschwander和Magruder, 2016)。光子计数激光雷达不同于小光斑激光雷达，光子点云密度较低，不能对采样范围内的地物实现完整观测，光子的空间分布与树木形状有直接关系。另一方面，受实验数据源的限制，在斯奈德县研究区使用的是2019年冬季获取的ICESat-2数据，而作为参考的小光斑激光雷达数据则于2011年夏季获取，ATL08计算的森林结构参数受落叶影响会普遍低于参考值。

热带雨林结果较差的主要原因是在高森林郁闭度和多层级冠层条件下，光子穿透能力有限，仅有少量光子能够到达地面。此时ATL08产品中对于光子类型识别出现错误，会将零星的地面光子识别为噪声，而将植被光子信号识别为地面光子信号，导致提取的林下地形高于实际地面，从而低估森林结构参数，如图6(c)中的光子分类结果。并且在山地情况下，由于在山顶附近常常难以捕捉到地面光子，导致提取的林下地形低于实际地面，从而高估森林结构参数如图6(d)中相对GPS时间为22.06—22.07的光子分类结果。

4.4 误差分析

关于ATL08产品中森林结构参数的结果受森林覆盖度和地形坡度的影响，图10展示了温带森林和热带雨林在60%—80%和80%—100%两组森

林覆盖度情况下平均冠层高度误差随坡度增大的变化趋势。其中蓝色点线表示温带森林,红色点线表示热带雨林,圆点实线表示80%—100%覆盖度组,方点虚线表示60%—80%覆盖度组。从图中可以看出,各坡度情况下,温带森林和热带雨林80%—100%覆盖度组均比60%—80%覆盖度组误差更大。在大量光子能够穿透森林到达地面的温带森林地区,随着地形坡度的增大,森林平均冠层高度的误差并未有上升的趋势。而在光子难以穿透森林到达地面的热带森林地区,ATL08产品对于地面光子类型的识别结果差,在地形坡度大的地区会放大其对于森林结构参数计算的影响,如图6(d)中相对GPS时间为22.06—22.07的光子分类结果。导致随着地形坡度的增大,平均冠层高度的误差也随之增大,在坡度为0°—10°、10°—20°和20°—30°3组情况下,80%—100%覆盖度组的平均冠层高度的误差分别为5.7 m、6.6 m和9.3 m。

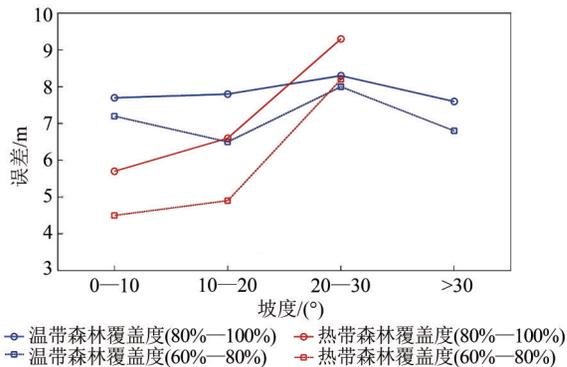


图10 不同地形坡度和覆盖度情况下森林平均冠层高度误差

Fig.10 Error of mean canopy height under different terrain slope and canopy cover

5 结论

本文以小光斑激光雷达数据做为参考,分析了温带和热带两种森林生态系统条件下,ATL08数据产品中提供的光子分类精度,评价了ATL08产品提供的森林平均高度、最大高度以及百分位高度指数用于森林高度估算的效果。结果表明,在温带森林情况下,ATL08产品能够较好地区分背景噪声光子和有效光子信号,并有效识别出地面光子和植被光子,但对冠层顶部光子的识别存在一定的不确定性,给最大高的估算造成一定的误差,ATL08数据产品中的森林高度指数普遍低于来自小光斑激光雷达计算的相应指数,百分位

高度指数随着百分比的增大越来越准确;在热带雨林情况下,特别是在浓密森林条件下,到达地面的光子数量少,ATL08中产品无法正确识别地面光子,或识别出的地面光子数量不足以刻画林下地形,从而导致森林高度指数出现严重错误。森林结构参数误差与森林覆盖度和地形坡度的定量分析结果表明,ATL08产品给出的平均冠层高度随着森林覆盖度的增大误差随之增大,在热带雨林区域,由于高森林覆盖度和多层级冠层的影响,林下地形刻画精度低,在地形坡度大的区域会增大误差,误差随着地形坡度的增大有增大趋势。因此,在高森林覆盖度情况下,ATL08产品难以直接用于森林高度的提取。

志 谢 感谢美国宇航局为本研究提供了所使用ICESat-2数据产品、G-LiHT机载小光斑激光雷达数据和印度尼西亚区域的小光斑激光雷达数据。

参考文献(References)

- Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, Csatho B, Farrell S L, Fricker H A, Harding D, Kwok R, Lefsky M, Markus T, Marshak A, Neumann T, Palm S, Schutz B, Smith B, Spinhirne J and Webb C. 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 735-751 [DOI: 10.1109/JPROC.2009.2034765]
- Brown M E, Arias S D, Neumann T, Jasinski M F, Posey P, Babonis G, Glenn N F, Birkett C M, Escobar V M and Markus T. 2016. Applications for ICESat-2 data: from NASA's early adopter program. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(4): 24-37 [DOI: 10.1109/MGRS.2016.2560759]
- Brunt K M, Neumann T A, Amundson J M, Kavanaugh J L, Moussavi M S, Walsh K M, Cook W B and Markus T. 2016. MABEL photon-counting laser altimetry data in Alaska for ICESat-2 simulations and development. *The Cryosphere*, 10(4): 1707-1719 [DOI: 10.5194/tc-10-1707-2016]
- Chen B W, Pang Y, Li Z Y, North P, Rosette J, Sun G Q, Suárez J, Bye I and Lu H. 2019. Potential of forest parameter estimation using metrics from photon counting LiDAR data in Howland research forest. *Remote Sensing*, 11(7): 856 [DOI: 10.3390/rs11070856]
- Cook B D, Corp L A, Nelson R F, Middleton E M, Morton D C, McCorkel J T, Masek J G, Ranson K J, Ly V and Montesano P M. 2013. NASA Goddard's LiDAR, hyperspectral and thermal (G-LiHT) airborne imager. *Remote Sensing*, 5(8): 4045-4066 [DOI: 10.3390/rs5084045]
- Farrell S L, Laxon S W, McAdoo D C, Yi D H and Zwally H J. 2009. Five years of Arctic sea ice freeboard measurements from the Ice, Cloud and land Elevation Satellite. *Journal of Geophysical Re-*

- search: Oceans, 114(C4): C04008 [DOI: 10.1029/2008JC005074]
- Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, Griffis T J, Jassal R S, Krishnan P, Grant N and Nesic Z. 2014. Eight years of forest-floor CO₂ exchange in a boreal black spruce forest: spatial integration and long-term temporal trends. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 25-35 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.08.010]
- Huang W L, Sun G Q, Dubayah R, Cook B, Montesano P, Ni W J and Zhang Z Y. 2013. Mapping biomass change after forest disturbance: applying LiDAR footprint-derived models at key map scales. *Remote Sensing of Environment*, 134: 319-332 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.017]
- Khan S A, Kjør K H, Bevis M, Bamber J L, Wahr J, Kjeldsen K K, Bjørk A A, Korsgaard N J, Stearns L A, van den Broeke M R, Liu L, Larsen N K and Muresan I S. 2014. Sustained mass loss of the northeast Greenland ice sheet triggered by regional warming. *Nature Climate Change*, 4(4): 292-299 [DOI: 10.1038/nclimate2161]
- Li M, Guo Y, Yang G and Shu R. 2017. A noise filter method for the push-broom photon counting LiDAR and airborne cloud data verification. *Science Technology and Engineering*, 17(9): 53-58 (李铭, 郭颖, 杨贵, 舒嵘. 2017. 一种推扫式光子计数激光雷达点云滤波算法及其验证. *科学技术与工程*, 17(9): 53-58) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.09.009]
- Li Z Y, Liu Q W and Pang Y. 2016. Review on forest parameters inversion using LiDAR. *Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1138-1150 (李增元, 刘清旺, 庞勇. 2016. 激光雷达森林参数反演研究进展. *遥感学报*, 20(5): 1138-1150) [DOI: 10.11834/jrs.20165130]
- Lu D S, Chen Q, Wang G X, Liu L J, Li G Y and Moran E. 2016. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1): 63-105 [DOI: 10.1080/17538947.2014.990526]
- Ma L X, Zheng G, Eitel J U H, Magney T S and Moskal L M. 2017. Retrieving forest canopy extinction coefficient from terrestrial and airborne LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 236: 1-21 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.01.004]
- Magruder L A and Brunt K M. 2018. Performance analysis of airborne photon-counting LiDAR data in preparation for the ICESat-2 mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(5): 2911-2918 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2786659]
- Manuri S, Andersen H E, McGaughey R J and Brack C. 2017. Assessing the influence of return density on estimation of LiDAR-based aboveground biomass in tropical peat swamp forests of Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 56: 24-35 [DOI: 10.1016/j.jag.2016.11.002]
- Markus T, Neumann T, Martino A, Abdalati W, Brunt K, Csatho B, Farrell S, Fricker H, Gardner A, Harding D, Jasinski M, Kwok R, Magruder L, Lubin D, Luthcke S, Morison J, Nelson R, Neuenschwander A, Palm S, Popescu S, Shum C K, Schutz B E, Smith B, Yang Y K and Zwally J. 2017. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190: 260-273 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.029]
- Melendy L, Hagen S C, Sullivan F B, Pearson T R H, Walker S M, Ellis P, Kustiyo, Sambodo A K, Roswintarti O, Hanson M A, Klassen A W, Palace M W, Braswell B H and Delgado G M. 2018. Automated method for measuring the extent of selective logging damage with airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139: 228-240 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.02.022]
- Narine L L, Popescu S, Neuenschwander A, Zhou T, Srinivasan S and Harbeck K. 2019. Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 224: 1-11 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.037]
- Neuenschwander A and Pitts K. 2019. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. *Remote Sensing of Environment*, 221: 247-259 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.005]
- Neuenschwander A L and Magruder L A. 2016. The potential impact of vertical sampling uncertainty on ICESat-2/ATLAS terrain and canopy height retrievals for multiple ecosystems. *Remote Sensing*, 8(12): 1039 [DOI: 10.3390/rs8121039]
- Nie S, Wang C, Xi X H, Luo S Z, Li G Y, Tian J Y and Wang H T. 2018. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data. *Optics Express*, 26(10): A520-A540 [DOI: 10.1364/OE.26.00A520]
- Popescu S C, Zhou T, Nelson R, Neuenschwander A, Sheridan R, Narine L and Walsh K M. 2018. Photon counting LiDAR: an adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 208: 154-170 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.019]
- Xia S B, Wang C, Xi X H, Luo S Z and Zeng H C. 2014. Point cloud filtering and tree height estimation using airborne experiment data of ICESat-2. *Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1199-1207 (夏少波, 王成, 刁晓环, 骆社周, 曾鸿程. 2014. ICESat-2 机载试验点云滤波及植被高度反演. *遥感学报*, 18(6): 1199-1207) [DOI: 10.11834/jrs.20144029]

Performance of ICESat-2 ATL08 product on the estimation of forest height by referencing to small footprint LiDAR data

DONG Jiachen^{1,2}, NI Wenjian¹, ZHANG Zhiyu¹, SUN Guoqing^{1,3}

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100094, China;

2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, Maryland, USA, 20742

Abstract: The ICESat-2 satellite, which operates through the technology of multi-beam single-photon-counting, provides a new opportunity for the mapping of global forest structures. Although previous studies based on the airborne simulator of ICESat-2 have shown that it has great potential to estimate forest structure parameters using single-photon-counting data, the performance of ICESat-2 needs to be examined due to the major differences between airborne system and ICESat-2. The National Aeronautics and Space Administration has released nine types of ICESat-2 data products, one of which is the vegetation canopy height and surface elevation data (ATL08). Therefore, the purpose of this paper is to evaluate the performance of ATL08 on the estimation of forest height by referencing to small-footprint LiDAR data.

The basis for the accurate estimation of forest height using photon-counting LiDAR data is the correct classification of photons, that is, identification of noise photons, ground photons, and vegetation photons. The ATL08 only records photon classification and forest structure parameters, and the geographical coordinates of each photon are recorded in the Terrain Elevation (ATL03) product. Therefore, ATL03 and ATL08 need to be connected first according to the organization of two products. Taking the data of small-footprint LiDAR as reference, the ATL08 products were evaluated from two aspects. First, the classification results of photons are evaluated by referencing to the profiles from the Digital Terrain Model (DTM) and the Digital Surface Model (DSM) derived using the small-footprint LiDAR data. Then, percentile height metrics of each 100-m-long segment in ATL08 product were evaluated by referencing to corresponding metrics calculated using the point cloud data of small-footprint LiDAR.

This study was carried out in two test sites: Snyder County in Pennsylvania, United States and Ketapang in West Kalimantan, Indonesia. These sites represented temperate forest and tropical rainforest, respectively. In the temperate forest, the classification accuracy of noise photons, ground photons, and canopy photons in ATL08 products were acceptable. The estimation accuracy of maximum canopy height was slightly better than that of mean canopy height with $R^2=0.61$ against 0.54 and RMSE=10.71% against 16.78%. In the tropical rainforest with relatively low canopy cover, the ground photons in ATL08 could be correctly identified. However, in the forest with high canopy cover, the number of photons near the ground is inadequate. In addition, the identified ground photons in ATL08 were not enough to fit the terrain under the forest, which caused obvious errors in the estimation of forest height. The results of the quantitative analysis of the error of mean canopy height between canopy cover and terrain show that with the increase of canopy cover, the error of canopy height calculated by ATL08 will increase. In the tropical rainforest, the error of the mean canopy height will increase as the slope increases. When the slope is 0° — 10° , 10° — 20° , and 20° — 30° , the error is 5.7 m, 6.6 m, and 9.3 m, respectively.

It can be concluded based on the results of this study that ATL08 product could be used to estimate the height of temperate forests. However, in dense tropical rainforests, due to the limited penetration capabilities of LiDAR and difficulties in the correct identification of ground photons, the existing ATL08 data will be difficult to use for forest height estimation.

Key words: ICESat-2, ATLAS, ATL08, forest structure parameters

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0603002)