

陆地生态系统碳监测卫星(TECIS)全波形激光雷达森林冠层高度反演精度分析:以加拿大魁北克温带针阔混交林为例

陈继溢¹, 李国元^{1,2*}, 彭军^{1,3}, 刘诏¹, 周晓青^{1,2}

1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;

3. 山东科技大学, 青岛 266590

摘要: 陆地生态系统碳监测卫星 (Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite, TECIS) 是我国首颗以激光雷达为主载荷, 以高精度监测陆地生态系统碳储量、森林资源和森林生产力为任务的遥感卫星, 可服务国家“双碳”战略、全国重要生态系统保护和修复重大工程监测评价等工作。本文详细评估了陆地生态系统碳监测卫星激光测高全波形数据不同RH (Relative Height) 指标表征森林冠层高度的能力, 对比了固定增益和可变增益全波形森林冠层探测能力的差异, 分析了坡度对冠层高度反演的影响。选取加拿大魁北克试验区的六轨数据进行试验分析, 结果表明以RH0为冠层高度起算基准时, 将明显高估冠层高度, 提高计算背景噪声阈值的背景噪声标准差倍数有利于提高冠层高度精度, 但效果有限, 而以RH5为冠层高度起算基准将大大提升冠层高度精度, 更大的RH起算基准如RH10以上则会低估冠层高度。陆地生态系统碳监测卫星固定增益全波形数据, 以RH5为冠层高度起算基准, 6倍背景噪声标准差计算背景噪声阈值, 剔除少量异常激光点后, 森林冠层不同百分比的高程反演精度的RMSE在3.58 m~4.23 m之间, ME小于1.0 m, MAE介于2.52 m~3.21 m之间。可变增益与固定增益全波形数据反演冠层高度的精度相当, 但计算背景噪声阈值的背景噪声标准差倍数比固定增益更小。以RH5为冠层高度起算基准显著优于波形分解的最后波峰位置, 并且受地形坡度的影响更小。可变增益和固定增益的配置有利于提高数据有效率。相关结论将有利于支撑陆地生态系统碳监测卫星激光测高数据在森林冠层高度反演中的应用。

关键词: 卫星激光测高, 陆地生态系统碳监测卫星, 全波形激光雷达, 森林冠层高度, 相对高度指标, 背景噪声阈值, 地形坡度, 冠层高度模型

中图分类号: TP701

引用格式: 陈继溢, 李国元, 彭军, 刘诏, 周晓青. XXXX. 陆地生态系统碳监测卫星(TECIS)全波形激光雷达森林冠层高度反演精度分析:以加拿大魁北克温带针阔混交林为例. 遥感学报, XX(XX): 1-21

Chen Jiayi, Li Guoyuan, Peng Jun, Liu Zhao, Zhou Xiaoqing. XXXX. Accuracy Analysis of Forest Canopy Height from Waveform LiDAR of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite (TECIS): A Case Study of Temperate Coniferous-broadleaved Mixed Forest in Quebec, Canada. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20244186]

1 引言

在生态文明建设、高质量发展的大背景下, 对森林的监测显得愈发重要。卫星激光测高技术是一种主动遥感手段, 对森林冠层具有一定的穿透力, 为森林冠层高度测量提供了可能性, 在估

算森林生物量方面具有巨大的优势。为更好地支撑国家“双碳”战略、全国重要生态系统保护和修复重大工程监测评价等任务, 我国于2022年8月发射了陆地生态系统碳监测卫星(以下简称“陆碳监测卫星”)。陆碳监测卫星是我国首颗以

收稿日期: 2024-05-15; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 陆地生态系统碳监测卫星天地一体化应用示范研究(BM2312)

第一作者简介: 陈继溢, 研究方向为卫星激光测高数据处理与应用。E-mail: chenjiy@lasac.cn

通信作者简介: 李国元, 研究方向为卫星激光测高、卫星遥感水资源调查监测等。E-mail: ligu_y@foxmail.com

激光雷达为主载荷的遥感卫星（张新伟，2022）。除激光测高系统之外，陆碳监测卫星还搭载了多角度多光谱仪器，以主被动相结合的测量方式，探测陆地生态系统植被生物量。

在此之前，国内外已有多个对地观测线性体制全波形激光测高载荷，包括美国的ICESat/GLAS（Schutz，2005）、GEDI（Dubayah，2020），我国的高分七号卫星（Tang，2020）。针对ICESat/GLAS获取的全波形数据，使用信号开始到结束的距离（称为波形范围），从信号开始到波形最大功率一半的距离（前沿范围），以及从信号末端到波形最大功率一半的距离（后缘范围）来估计最大冠层高度（Lefsky，2007）。ICESat/GLAS官方波形分解算法提供多达六个高斯分量，并且将最后一个高斯分量视为地面回波（Boudreau，2008）。相关研究表明，全波形激光雷达后向散射信号可能会因足迹内的地形条件而失真，LIVS机载飞行试验提供的最大森林冠层高度RMSE达到4.99m，经过简单的坡度校正后提高了0.39m，对于GLAS数据，则从12.74m提高到7.83m，剔除粗差后达到5.32m（Park，2014）。GEDI由美国于2018年搭载在国际空间站上，主要用于获取森林垂直结构数据，评估气候变化和土地利用对生态系统结构和动态的影响（Dubayah，2020）。GEDI系统在轨获取的数据经处理后形成了多种产品，其中L2A产品提供相对高度（Relative Height，RH）指数，并设置六组不同参数，包括滤波参数、背景噪声阈值等，为不同的环境下的地面高程和森林冠层高度测量提供了多样化的选择（Hofton，2019）。有研究针对GEDI L2A数据分析了六组参数的RH指标对地面高程和森林冠层高度精度的影响，结果表明不同的参数在不同的覆盖度条件下各有优劣（Adam，2020；刘丽娟等2021），地表高度精度在3.0m左右，冠层高度精度约为5.5m。GEDI白天和夜间的数据提取森林冠层高度具有明显的差异，仅使用夜间的数据，RMSE从5.02m降到3.56m（Liu，2021）。高分七号卫星搭载的激光测高系统主要服务于全球高程控制点获取（李国元，2021），因激光发射重频较低，在森林生物量的应用潜力有限，但也显示了不错的效果（Du，2023）。尽管利用ICESat/GLAS和GEDI全波形数据反演森林冠层高度的研究已经较为丰富，但针对国产陆碳监测卫星激光全波形反演冠层高度的研

究较少。由于载荷硬件参数具有较大的差异，陆碳监测卫星在森林冠层高度的能力亟需深入挖掘。

本文利用陆碳监测卫星激光全波形数据，分析了不同RH指标反演的冠层高度与光斑范围内机载LiDAR点云生产的冠层高度模型（Canopy Height Model，CHM）的关系，评估其反演冠层高度的精度。另外，本文还分析了陆碳监测卫星固定增益和可变增益激光全波形冠层高度探测能力的差异、地形坡度对激光全波形冠层高度反演的影响。本文的研究有利于构建全波形不同RH指标反演的冠层高度与实际树高的关系，支撑陆碳监测卫星激光全波形数据在我国乃至全球森林碳汇监测中的应用。

2 试验区与数据

2.1 陆碳监测卫星多波束激光雷达

陆碳监测卫星搭载了多波束激光雷达、多角度多光谱相机、超光谱探测仪、多角度偏振成像仪等多个载荷（张新伟，2022）。多波束激光雷达（本文均特指植被探测，另有一个波束用于大气探测）具有5个波束，波束间垂轨距离约为4km，激光发射重频达到40Hz，沿轨方向激光地面足印间隔约为170m，如图1所示，全波形采样频率为1.2GHz，主要技术指标如表1所示。

表1 陆碳监测卫星多波束激光雷达主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of the TECIS Multi-Beam LiDAR

参数	设计值
波束数量	5波束
激光波长	1064 nm
激光能量	70 mJ
激光发射重频	40 Hz
全波形采样频率	1.2 GHz
激光足印直径	25 m
垂轨方向光斑间距	4 km
沿轨方向光斑间距	170 m
足印影像地面分辨率	8.0 m
足印影像幅宽	1 km×8.2 km
足印影像量化位数	12 bit

陆碳监测卫星多波束激光雷达将接收的回波信号分为两路，通过不同的信号增益分别采样形成全波形数据，因此提供了固定增益和可变增益

两组全波形数据。同一个激光回波的固定增益和可变增益全波形如图2所示，固定增益和可变增益全波形数据形态基本一致，细节略有差异。本文利用多波束激光雷达获取的激光测高数据开展森林冠层高度反演试验，分析其森林冠层探测能力。

2.2 试验区

试验区位于加拿大魁北克省西南部，经度范围为 76.25° W~75.0° W，纬度范围为 45.37° N~47.38° N，高程在 40m~780m 之间，平均高程约为 278.9 m，西南部较为平坦，东北部为山地，地表坡度在 0~53° 之间，平均坡度约为 13.3°。试验区属于温带气候，有丰富的森林资源，主要由针叶树和阔叶树组成，包括松树、云杉、白杨、枫树等。参考数据通过机载 LiDAR 获取，采集时间为 2018 年 6 月~9 月（植被生长季节），点云密度为 2~4 pt/m²，经规范化处理后形成 CHM 产品、地表坡度产品，由加拿大魁北克省发布（User's Guide:

Products Derived from LiDAR Data)。CHM 产品的分辨率为 1 m，地表坡度产品的分辨率为 2 m。根据 CHM 和坡度产品，该试验区大部分被森林覆盖，最大冠层高度达到 65 m，平均冠层高度约为 11.7 m。

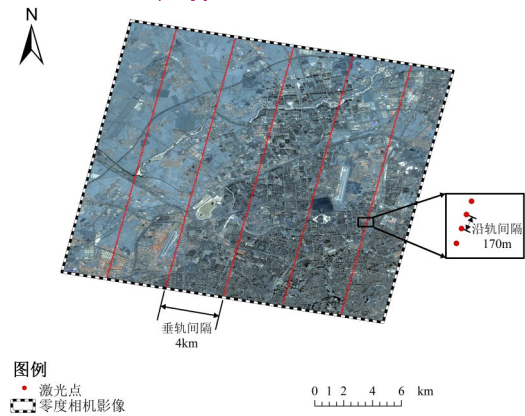


图1 陆碳监测卫星激光数据分布
Fig.1 Distribution for laser altimetry data of the TECIS multi-beam LiDAR

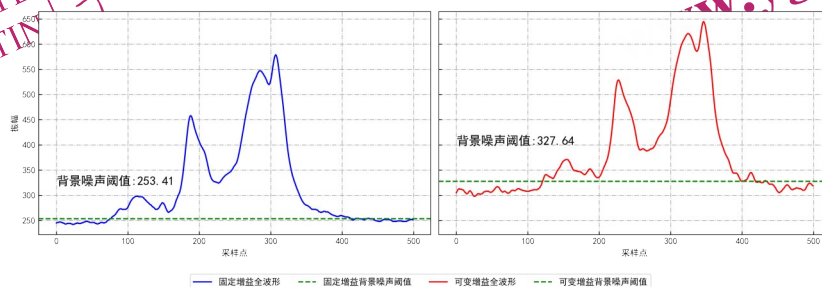


图2 陆碳监测卫星多波束激光雷达固定增益和可变增益全波形
Fig. 2 Fixed gain waveform and variable gain waveform of the TECIS multi-beam LiDAR
(a)固定增益 (b)可变增益
(a)Fixed gain waveform (b)Variable gain waveform

2.3 试验数据

陆碳监测卫星获取的激光测高数据经地面系统处理后形成 L2 级产品分发给用户（陈新阳，2023）。L2 级产品包含了各个波束的激光地面足印点的经纬度高程、全波形数据、光轴监视影像等数据。陆碳监测卫星在轨定标表明，激光测高数据高程精度优于 0.7 m，平面定位精度优于 6 m（陈新阳，2023）。本文选择过境试验区的六轨陆碳监测卫星激光测高数据，获取日期分别为 2023 年 9 月 1 日 5969 轨、9 月 16 日 6197 轨、9 月 21 日 6274 轨、9 月 2 日 6350 轨、10 月 1 日 6426 轨、10 月 6 日 6502 轨。在此期间，陆碳监测卫星只有三

个激光器开机工作。

为避免非林区的数据使试验结果产生偏差，利用 30 米分辨率的全球地表覆盖数据 GlobeLand30（Chen, 2018; Wang, 2018）对激光点进行筛选，剔除非森林区域的激光点。试验区获取森林区域的陆碳监测卫星激光点共 9075 个，其中 8383 个激光点具备固定增益全波形数据，8211 个激光点具备可变增益全波形数据，共有 7519 个激光点同时具备固定增益和可变增益全波形数据。陆碳监测卫星激光点和参考数据 CHM 产品、地表坡度产品的分布如图 3 所示。

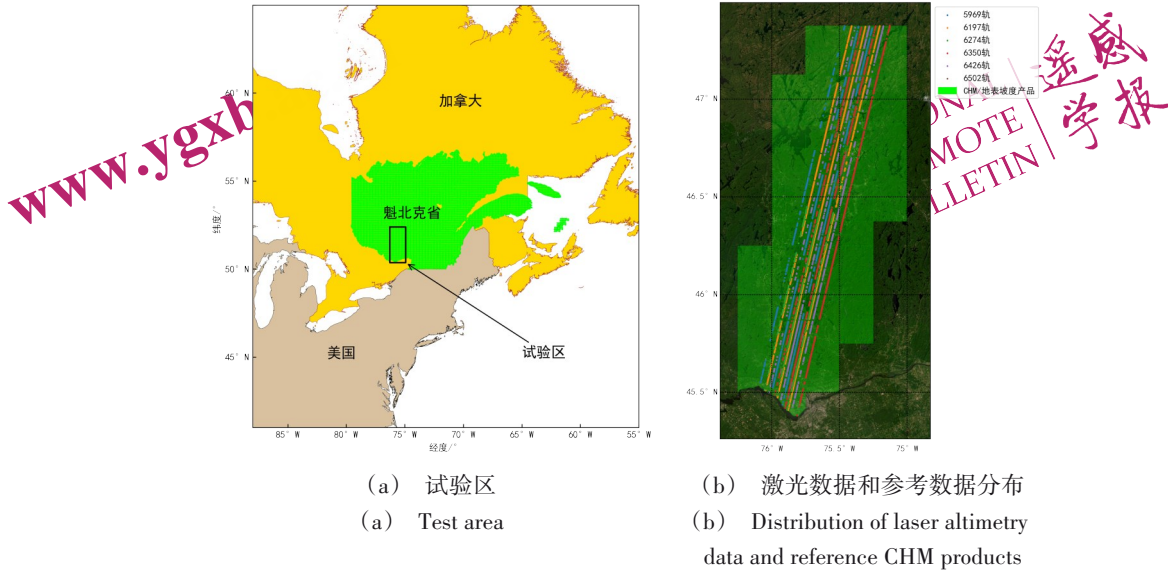


图3 陆碳监测卫星激光数据和参考CHM产品的分布

Fig.3 Distribution of terrestrial ecosystem carbon monitoring satellite laser altimetry data and reference CHM products

3 研究方法

3.1 RH指标

RH指标通常定义为全波形百分比（即0%~100%）累积能量到地表回波位置的垂直距离（Dubayah, 2020; Hofton, 2019）。但在森林区域，地表回波通常难以确定，本文计算RH指标时以波形有效部分结束位置为准。RH指标的计算如下式：

$$E_i = \sum_{i=P_{end}}^{P_{begin}} f(i) \quad (1)$$

$$PRH_n = \text{argpercent}_n \{E_i\} \quad (2)$$

$$RH_n = (PRH_n - PRH_0) * c / 2K \quad (3)$$

其中 $f(i)$ 为全波形的振幅， E_i 为全波形有效部分累积能量， PRH_n 为百分之 n （取值为0~100）的累积能量的采样位置， P_{end} 为全波形有效部分的结束位置，即计算累积能量的起始位置， P_{begin} 为全波形有效部分的开始位置，即计算累积能量的结束位置， argpercent_n 为计算一个数组中指定百分比分位数位置的函数， K 为陆碳监测卫星全波形信号采样频率，即1.2 GHz， c 为真空中的光速。

RH指标以RH0开始至RH100总共可以计算101个RH指标，图4显示了部分RH指标（RH0、RH5、RH50、RH75、RH95、RH100）。RH指标通常用来描述树木冠层的垂直结构，是GEDI激光

数据处理和分析中非常重要的一个指标，可以用于分析地形、建立地形模型、计算植被高度等应用。

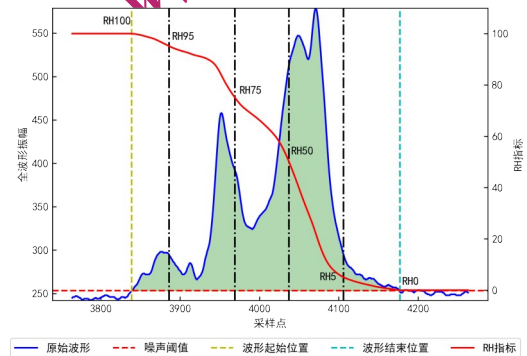


图4 全波形RH指标

Fig.4 RH Metrics of waveform

3.2 冠层高度计算

冠层高度的计算通常是使用全波形检测到的最高值减去最后一个波峰对应的高度（Hofton, 2000; Dubayah, 2020; Adam, 2020），也有研究使用RH95或其他百分比RH计算冠层高度（Dhargay, 2022; Li, 2023; Ngo, 2023）。然而，有研究显示全波形分解的最后一个高斯峰并不总是表示地面信号的大部分（Rosette, 2008）。并且，森林区域全波形通常比较复杂，增加了波形分解的难度和不确定性（Zhou, 2021）。为选取合适的冠层高度起算基准位置，本文分别以RH0，

RH5、RH10、RH15、RH20 和全波形分解的最后一个波峰位置（由陆碳监测卫星 L2B 产品提供）为冠层高度的起算基准。计算冠层高度并进行精度评估。冠层高度可由下式计算：

$$CH_y = RH_y - RH_x \quad (4)$$

其中 RH_y 为计算冠层高度顶部的 RH 指标， y 取值为 100、95、90、85、80， RH_x 为冠层高度起算的 RH 指标， x 取值为 0、5、10、15、20 或全波形最后一个波峰对应的 RH 值， CH_y 为全波形反演的激光足印范围内 100%、95%、90%、85%、80% 冠层高度值。

背景噪声阈值决定了全波形数据的有效波形部分，会影响分森林层反演的结果，GEDI 官方给出了六组不同背景噪声阈值的 RH 指标值供用户使用。本文利用不同的背景噪声标准差 (σ) 倍数，即 3σ 、 4.5σ 、 6σ 、 7.5σ ，设置了四组背景噪声阈值，分析背景噪声阈值对冠层高度的影响。

3.3 精度验证

冠层高度是一个相对高程，无需进行高程转换，可以在平面坐标转换后使用 CHM 产品进行评估。星载激光雷达通常具有较大的足印，碳卫星激光地面光斑直径约为 25m，因此，地面光斑范围的冠层高度具有一定的模糊性。同时，森林冠层对机载激光雷达和星载激光雷达信号的反射特性差异巨大。为更好的探索全波形提取的冠层高度和机载点云获取的冠层高度产品之间的关系，取激光足印范围内 CHM 产品的所有冠层高度，分别计算最大（100%）、95%、90%、85%、80% 冠层高度、平均冠层高度作为参考值：

$$CH_q = \text{percentile}_q(CHMs) \quad (5)$$

$$CH_{\text{aver}} = \text{mean}(CHMs) \quad (6)$$

其中 CH_q 为激光地面足印范围内 CHM 产品 q 百分比的冠层高度， q 取值为 100、95、90、85、80、75，分别记为 CH_{max} 、 CH_{95} 、 CH_{90} 、 CH_{85} 、 CH_{80} 、 CH_{75} ， percentile 为计算一个数组中指定百分比分位数值函数， CH_{aver} 为足印范围内 CHM 产品冠层高度均值， $CHMs$ 为从 CHM 产品获取的激光地面足印范围内所有冠层高度的数组。

获取冠层高度参考值后，统计全波形不同 RH 指标计算的冠层高度误差的 RMSE，ME，MAE 作

为精度指标，分析全波形反演冠层高度的能力。对于陆碳监测卫星可变增益的全波形数据，采用相同的方法进行冠层高度提取和精度验证。

4 结果分析

4.1 不同 RH 指标的冠层高度精度

不同 RH 指标的冠层高度精度结果如图 5~7 所示，图中横轴方向为 CHM 产品的冠层高度，纵轴方向为陆地生态系统碳卫星全波形数据反演的冠层高度。从图中可以看到，以 RH0 为冠层高度计算的起算基准时，全波形 85% 冠层高度相对于 CHM 的最大冠层高度最接近，三个精度指标达到最小，RMSE 为 7.28m，ME 为 2.02m，MAE 为 5.62m。说明以 RH0 为冠层高度计算的起算基准时，即使用全波形 RH85 指标也会高估冠层高度，其它更高 RH 指标（RH90、RH95、RH98、RH100）对冠层高度的高估程度更大。分别使用 RH5、RH10、RH15 为冠层高度计算的起算基准，全波形反演冠层高度的各项精度指标均先升高再降低。以 RH15 为冠层高度计算的起算基准时，大部分的 ME 值都为负值，即低估冠层高度。综合看来，使用 RH5 作为冠层高度起算基准的精度是最优的，全波形各项 RH 指标反演的冠层高度和 CHM 产品冠层高度相关性非常强，即最优的精度指标在精度图的对角线附近。具体而言，全波形 98% 冠层高度和 CHM 最大冠层高度最接近，RMSE 为 5.26m，ME 为 -1.20m，MAE 为 3.30m；全波形 95% 冠层高度和 CHM 产品的 95% 冠层高度最接近，RMSE 为 4.81m，ME 为 -0.20m，MAE 为 3.01m；全波形 90%、85% 冠层高度分别和 CHM 产品的 90%、85% 冠层高度最接近，RMSE 分别为 4.67m 和 4.62m，ME 分别为 2.60m 和 -0.90m，MAE 分别为 2.87 和 2.84m。

从图中还可以看出，使用全波形最后一个波峰作为冠层高度起算基准时，各个 RH 指标计算冠层高度的精度介于 RH15 和 RH20 之间，会低估冠层高度（ME 值为负），各项精度指标均低于使用 RH5 作为冠层高度起算基准的精度。其原因一方面可能是林下地表的回波信号被冠层回波信号掩盖，另一方面也与陆碳监测卫星 L2 级产品中波形分解结果有关。

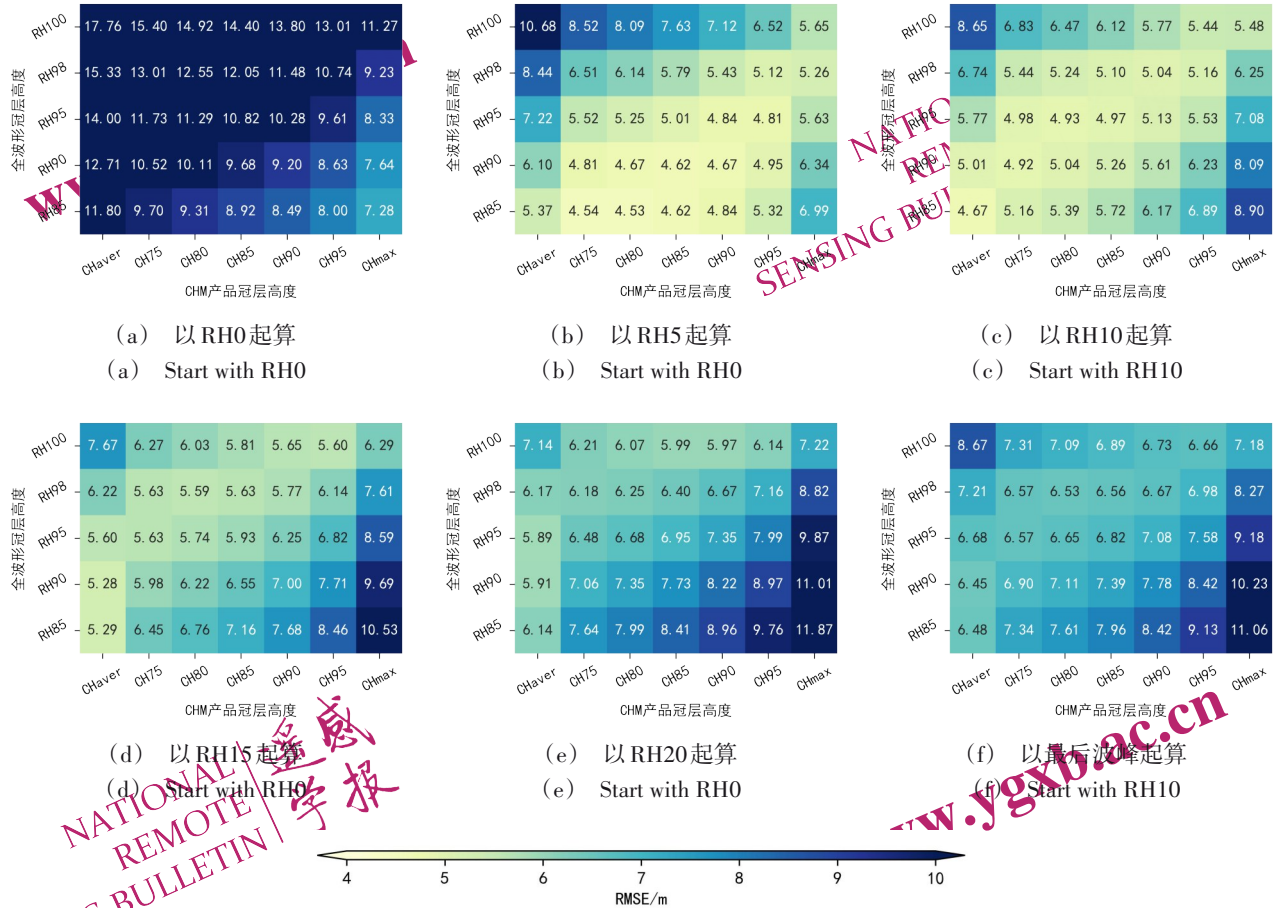


图5 全波形不同RH指标计算的冠层高度中误差(4.5σ)

Fig. 5 The RMSEs of canopy height calculated by different RH metrics (4.5 σ)

4.2 不同背景噪声阈值的冠层高度精度

以RH5为冠层起始基准，不同背景噪声阈值的冠层高度精度情况如图8~10所示。从图中可以看到，提高背景噪声阈值，各项精度也有不同程度的提升，特别是背景噪声标准差倍数较小时。当背景噪声阈值达到6倍背景噪声标准差时，基本达到最优状态。此时，全波形RH85反演的冠层高度与CHM的75%冠层高度最接近，RMSE达到4.05m，ME达到-0.09m，MAE达到2.68m，各项精度指标达到最优。在最大冠层高度方面，全波形100%冠层高度依然会略微高估，RMSE为5.05m，ME为0.53m，MAE为3.55m。其它对应的冠层高度精度RMSE在4.0~4.5m，ME小于1.0m，MAE在2.6~3.2m之间。全波形数据反演的冠层高度均明显比CHM产品计算的平均冠层高度偏高，RMSE、ME和MAE分别都在4.88m、2.45m、3.80m以上。另外，不同背景噪声阈值对冠层高度的影响没有不同RH起算基准明显。

从图中还可以看出，使用RH5作为冠层高度起算基准，不同的背景噪声阈值，全波形百分比冠层高度和CHM产品百分比冠层高度相关性依然非常强。图11显示了背景噪声阈值为6倍背景噪声标准差，并且使用RH5作为冠层起算基准时，全波形的RH100、RH98、RH95、RH90、RH85冠层高度分别和CHM产品的最大、95%、90%、85%、80%、75%冠层高度的相关性。从图中可以看到，从全波形提取的冠层高度与CHM产品的冠层高度有很强的相关性。并且，随着计算冠层高度的RH指标的降低，与对应百分比的CHM产品相关性呈现升高的趋势。值得注意的是，不同的RH指标反演的冠层高度都有一小部分比CHM产品的冠层高度明显偏低（图中右下角颜色偏红的激光点），这可能与CHM产品和陆碳监测卫星激光数据的时相有关系，即地物发生了变化。经统计，以15m为阈值，六组对比数据中这类点分别有182个（2.2%）、123个（1.5%）、106个（1.3%）、97

个 (1.2%)、98 个 (1.2%)、83 个 (1.0%)，数量依次减小，并且所占比例非常小，最高不足 2.2%。

剔除这些粗差值之后，全波形数据计算的冠层高度精度如表 2 所示。

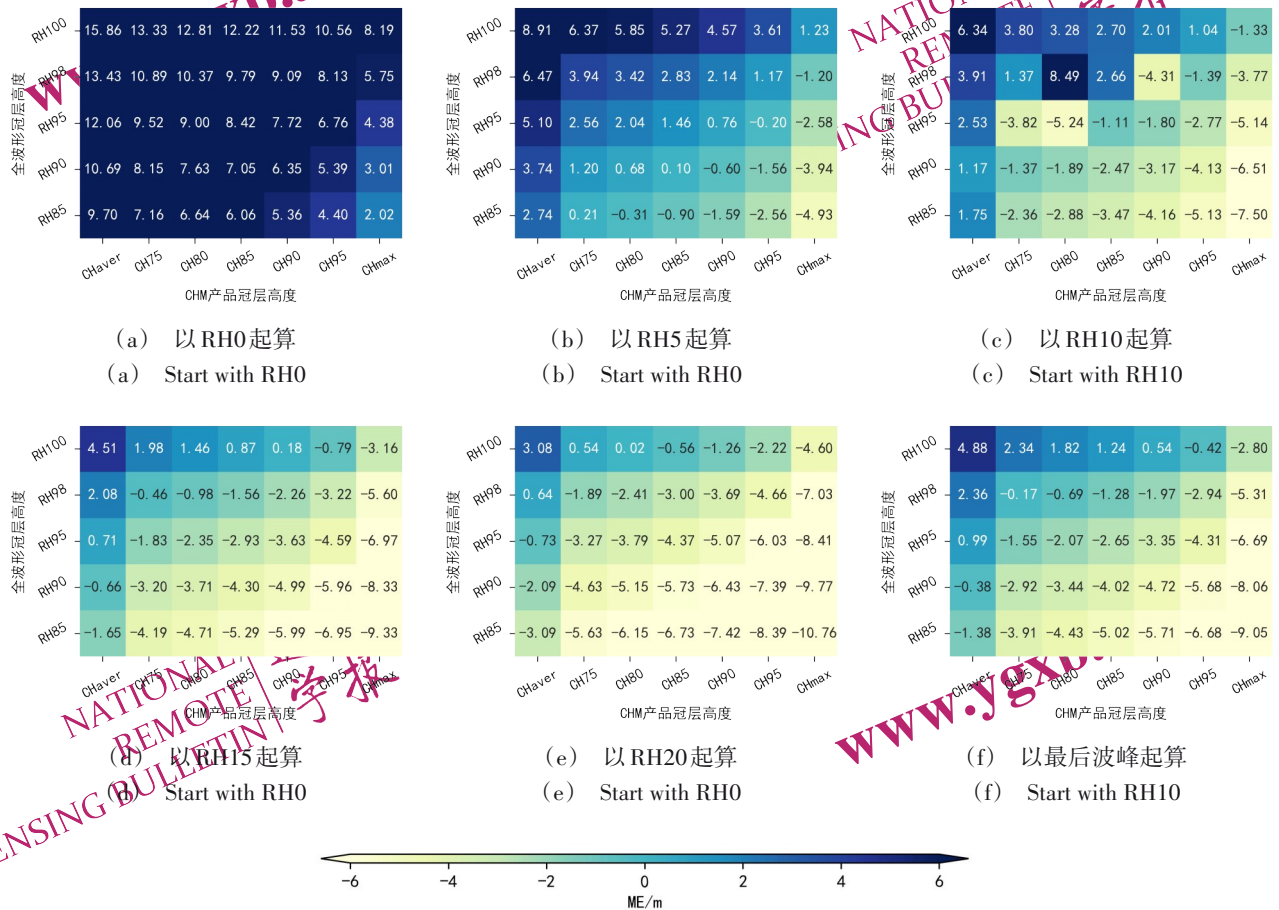


图 6 全波形不同 RH 指标计算的冠层高度误差均值 (4.5σ)
Fig. 6 The MEs of canopy height calculated by different RH metrics (4.5σ)

4.3 固定增益和可变增益全波形冠层高度对比

可变增益全波形和固定增益全波形具有不同的背景噪声水平，因此可变增益全波形数据反演冠层高度的最佳参数与固定增益略有不同。采用同样的方法对可变增益的全波形数据反演的冠层高度进行分析，精度结果如图 12~14 所示。与固定增益类似，各项精度指标 RMSE、ME、MAE 依然在以 RH5 为冠层起算基准时达到最优。并且，使用全波形最后一个波峰作为冠层高度起算基准时，冠层反演精度亦介于 RH15 和 RH20 之间，各项精度指标均低于使用 RH5 作为冠层高度起算基准的精度。

以 RH5 为冠层起始基准，可变增益全波形不同背景噪声阈值的冠层高度精度情况如图 15~17 所示。图中可以看到，对于可变增益，较低的背景

噪声阈值反而精度更优。使用 3 倍背景噪声标准差计算背景噪声阈值时全波形冠层高度的 RMSE 在 4.0~5.1m，ME 基本在 1.0m 以内，MAE 在 2.7m~3.6m 之间。

通过上述试验，针对固定增益和可变增益的全波形数据分别选取最佳的背景噪声阈值和冠层起算 RH 基准。固定增益和可变增益全波形分别以 6 倍和 3 倍背景噪声标准差计算背景噪声阈值，且均以 RH5 为冠层起算基准，分别评价全波形 RH100、RH98、RH90、RH85 反演冠层高度的精度。从结果中可以看到，固定增益和可变增益全波形数据反演的冠层高度精度差异很小，结果基本一致。全波形 RH98、RH95、RH90、RH85 反演的冠层高度与 CHM 产品的 95%、90%、85%、80% 冠层高度最为接近。最终，固定增益和可变增益

全波形 RH 指标反演冠层高度的精度对比情况如表 3 所示。随着冠层高度百分比降低，全波形 RH 指标反演的冠层高度精度呈现上升的趋势。这与实

际情况是吻合的，因为同一范围内冠层高度越高，冠层的总叶面积越小，对全波形信号的反射能量越小，激光高程精度不确定性越高。

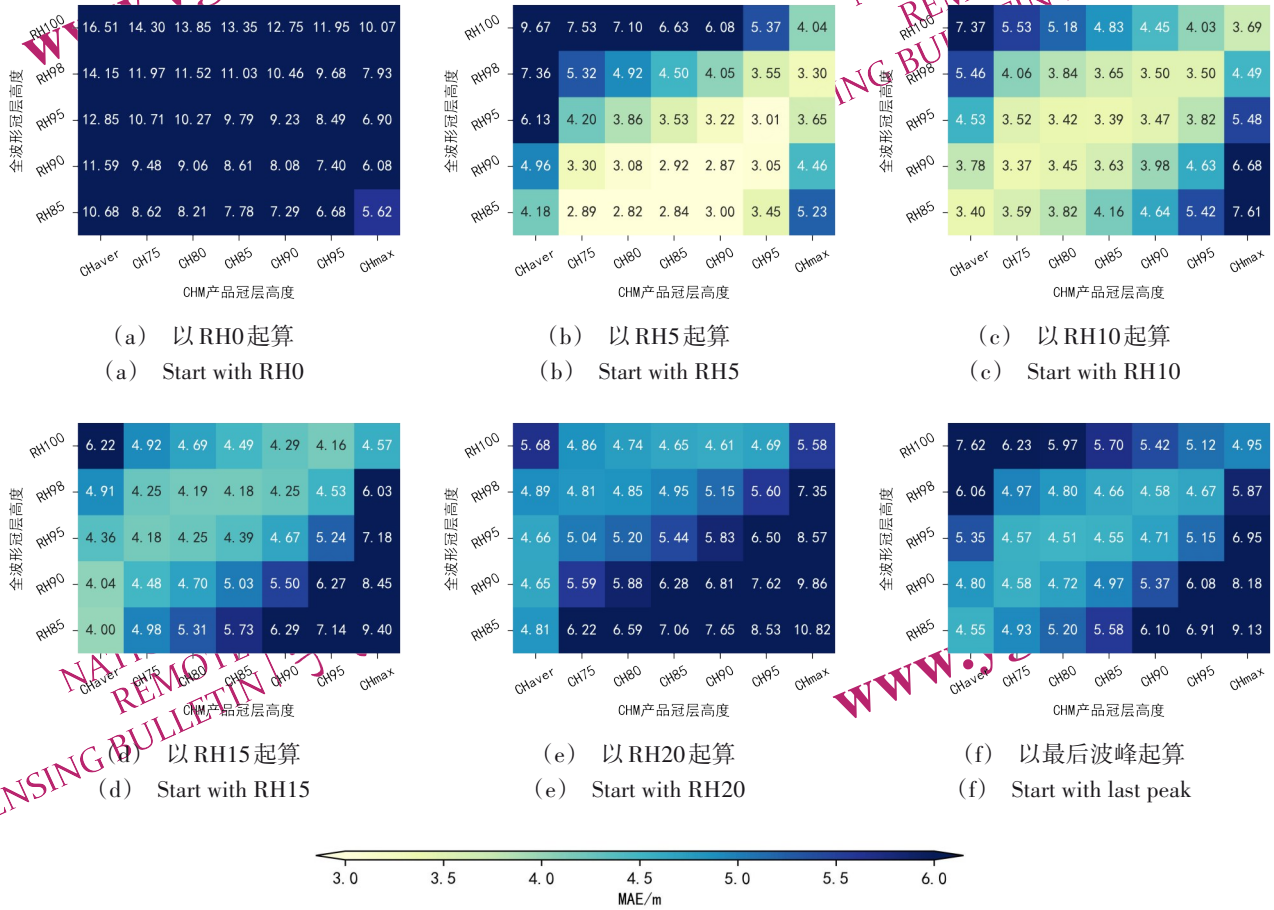


图 7 全波形不同 RH 指标计算的冠层高度误差平均绝对误差(4.5σ)
Fig. 7 The MAEs of canopy height calculated by different RH metrics (4.5σ)

值得一提的是，试验区内激光点共计 9075 个，但只有 7519 个激光点兼有固定增益和可变增益的全波形数据。因此，有 692 个激光点仅采集到有可变增益的全波形数据。可见，陆碳监测卫星增加可变增益通道使其在本试验区探测的有效数据提升了 8.3%。

4.4 地形对全波形冠层高度反演的影响

考虑到地形坡度对全波形冠层高度反演有较大的影响，根据测区的地表坡度产品获取激光足印范围内的平均坡度。利用坡度值将激光点所在地形分为平地 (<2°)、丘陵 (2°~6°)、山地 (6°~25°)、高山地 (>25°) 四类。分别统计不同坡度条件下，陆碳监测卫星固定增益和可变增益全波形 RH 指标反演森林冠层高度的精度，结果如表 4 所

示。其中，固定增益分别以 RH5 和最后波峰位置为冠层起算基准，并使用 6 倍背景噪声标准差计算背景噪声阈值；可变增益分别以 RH5 和最后波峰位置为冠层起算基准，并使用 3 倍背景噪声标准差计算背景噪声阈值。计算 RH100、RH98、RH95、RH90、RH85 反演的冠层高度，并采用 CHM 产品的最大、95%、90%、85%、80% 冠层高度作为参考值，评价全波形 RH 指标在不同地形条件下反演冠层高度的精度。

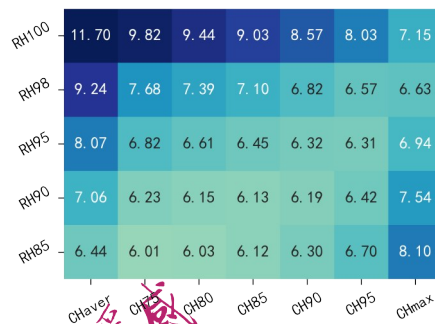
注 1：因地形坡度数据有少量漏洞，不同地形的激光点数之和略小于总点数。

注 2：固定增益背景噪声阈值使用 6σ 计算，可变增益背景噪声阈值使用 3σ 计算。

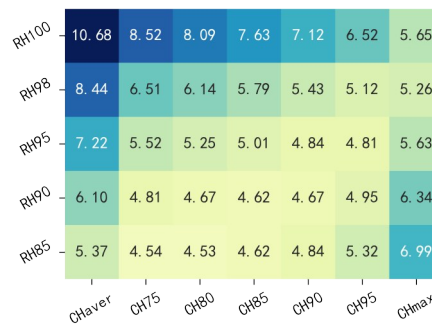
从表中可以看出，除了 RH100 反演的冠层高

度以外, 固定增益和可变增益全波形反演的冠层高度随地形坡度的增大而下降。这种趋势对于以波形分解的最后波峰位置为冠层高度起算基准时尤为明显。在平地区域, 以波形分解的最后波峰位置与RH5反演的冠层精度基本相当, RH98和RH95反演的冠层高度的精度甚至更优。但随着地形坡度增大, 以最后波峰为冠层高度起算基准的精度显著下降, 并且均是低估冠层高度, 低估程度达到4~6m, RMSE甚至超过8m。而以RH5为冠

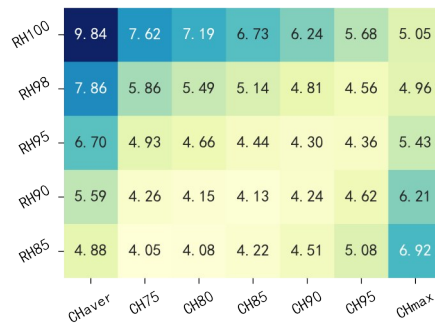
层高度起算基准时, 不同地形条件下全波形反演的冠层高度虽有下降, 但下降幅度有限, 不同地形反演冠层高度的RMSE基本都在4.5m以内。特别是在丘陵和山地区域, 以RH5为起算基准反演的冠层高度精度相当, 说明使用RH5为冠层高度起算基准反演冠层高度受地形坡度影响更小。因此, 以RH5为起算基准反演的冠层高度显著优于以波形分解的最后波峰位置为起算基准。



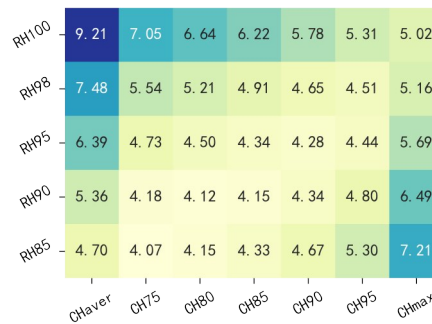
(a) 以 3σ 计算背景噪声阈值
(a) Calculate background noise threshold using 3σ



(b) 以 4.5σ 计算背景噪声阈值
(b) Calculate background noise threshold using 4.5σ



(c) 以 6σ 计算背景噪声阈值
(c) Calculate background noise threshold using 6σ



(d) 以 7.5σ 计算背景噪声阈值
(d) Calculate background noise threshold using 7.5σ

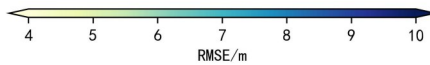
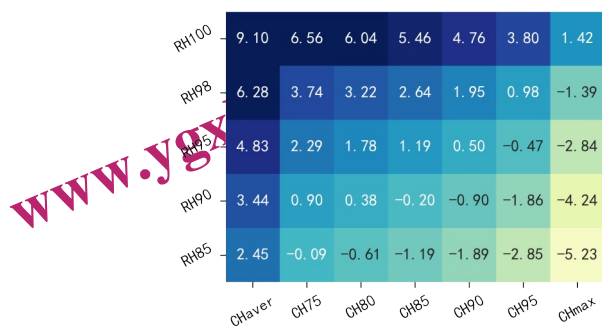
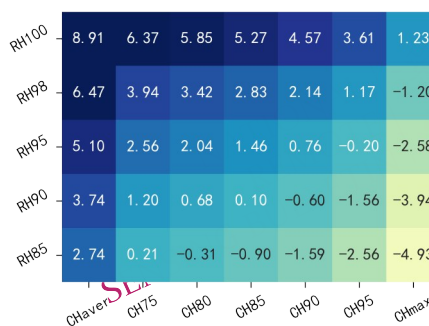


图8 全波形不同背景噪声阈值计算的冠层高度中误差(RH5)
Fig. 8 The RMSEs of canopy height calculated by different thresholds of background noise (RH5)



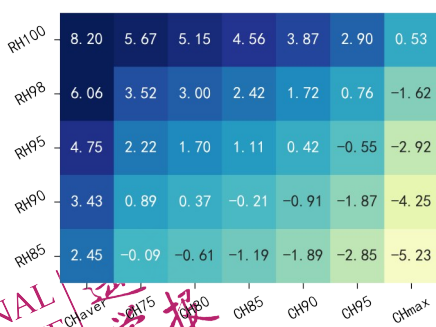
(a) 以 3σ 计算背景噪声阈值

(a) Calculate background noise threshold using 3σ



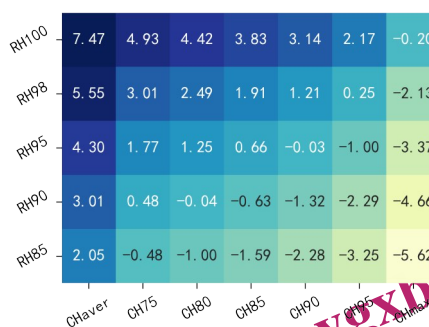
(b) 以 4.5σ 计算背景噪声阈值

(b) Calculate background noise threshold using 4.5σ



(c) 以 6σ 计算背景噪声阈值

(c) Calculate background noise threshold using 6σ



(d) 以 7.5σ 计算背景噪声阈值

(d) Calculate background noise threshold using 7.5σ

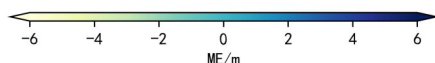


图9 全波形不同背景噪声阈值计算的冠层高度误差均值(RH5)

Fig. 9 The MEs of canopy height calculated by different thresholds of background noise (RH5)

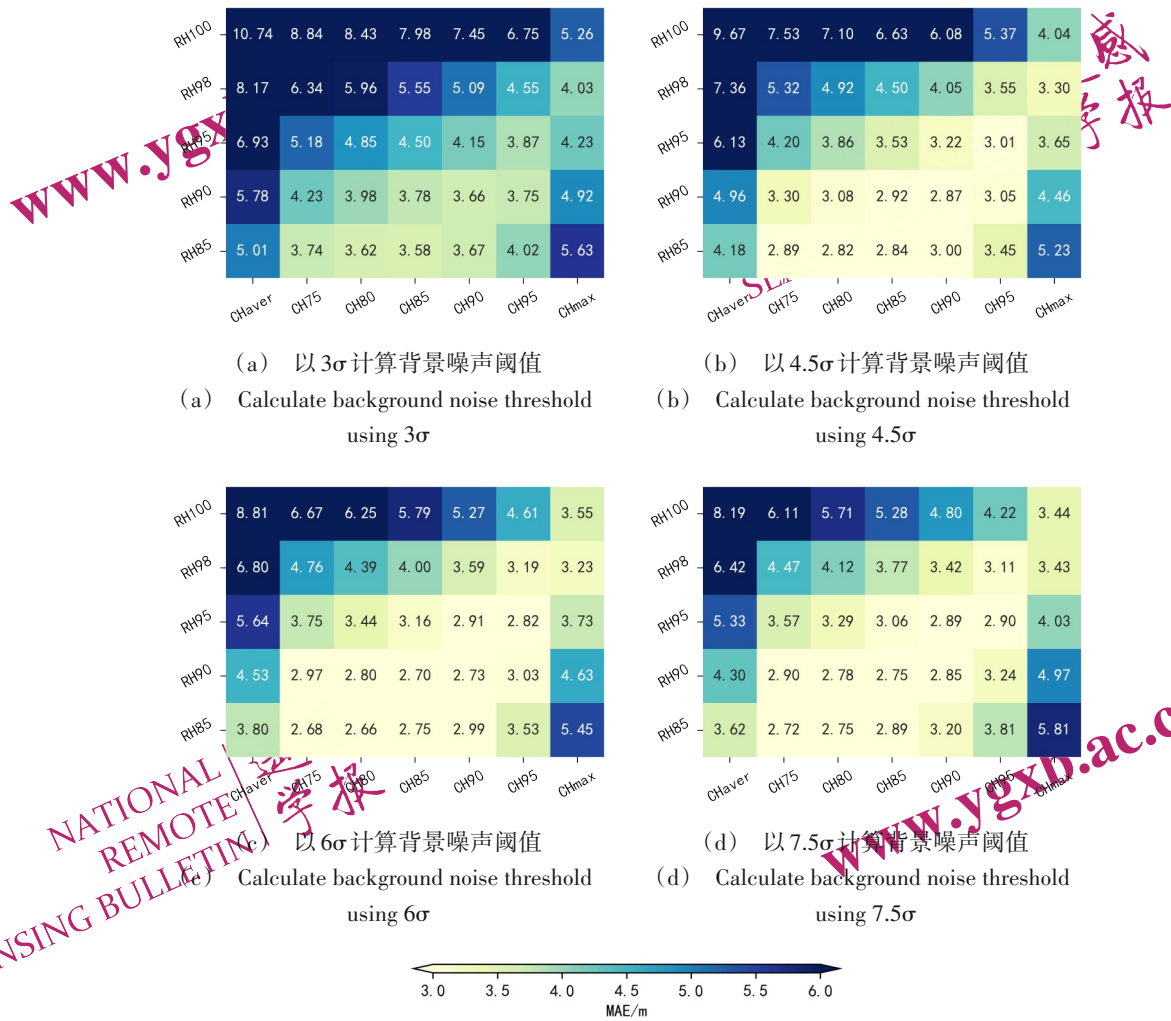


图 10 全波形不同背景噪声阈值计算的冠层高度平均绝对误差(RH5)

Fig. 10 The MAEs of canopy height error calculated by different thresholds of background noise (RH5)

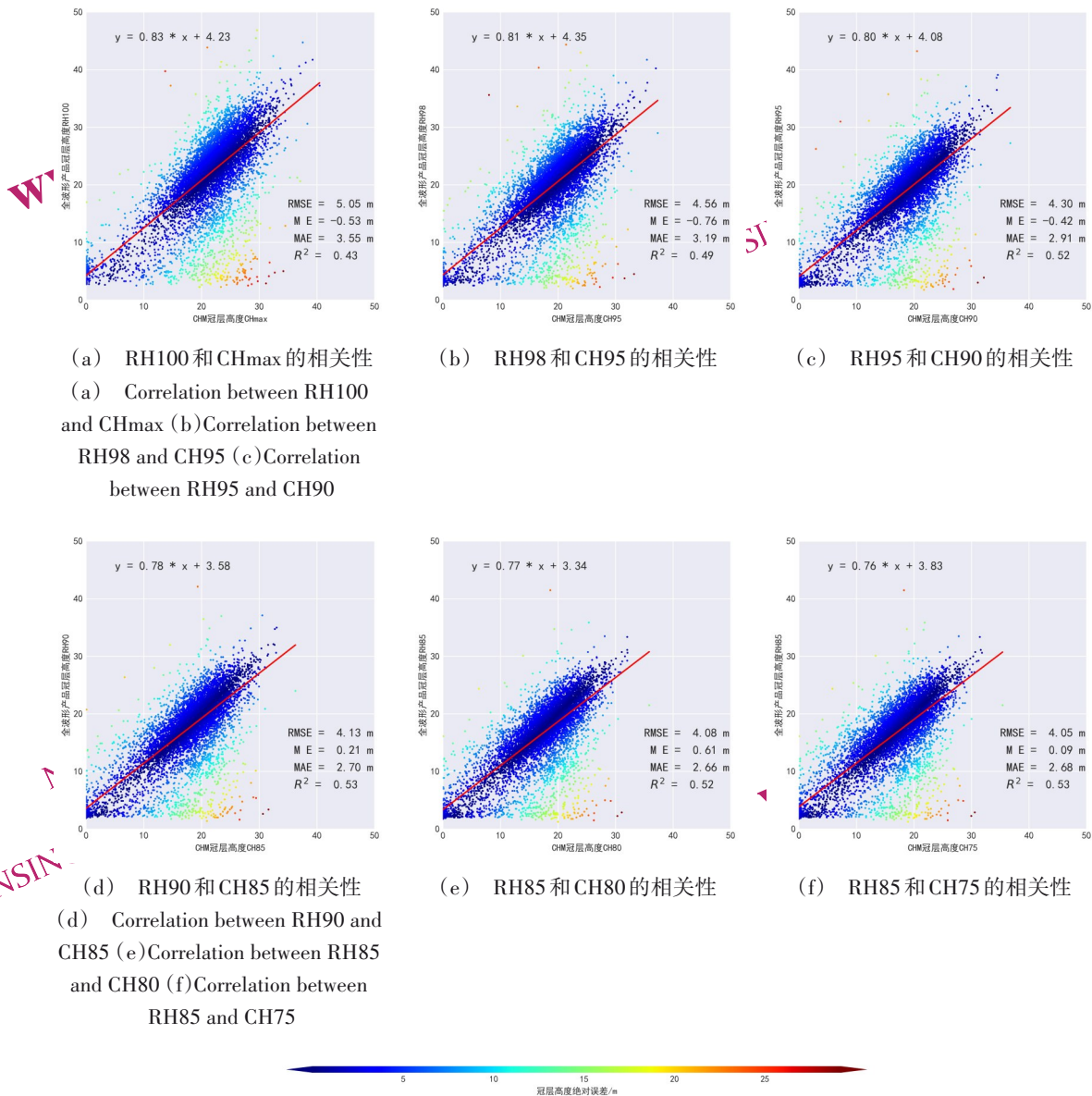


图 11 全波形和CHM产品不同百分比冠层高度相关性(RH5、6σ)
 Fig. 11 Correlation of canopy height between waveform data and CHM products (RH5、6σ)

表 2 剔除粗差后全波形反演的冠层高度精度统计
 Table 2 Accuracy statistics of canopy height derived from full waveform without gross errors

项目	RMSE	ME	MAE
全波形冠层高度 RH100(CHmax)	4.23	-0.90	3.21
全波形冠层高度 RH98(CH95)	3.98	-0.97	2.96
全波形冠层高度 RH95(CH90%)	3.77	-0.62	2.71
全波形冠层高度 RH90(CH85)	3.62	0.02	2.52
全波形冠层高度 RH85(CH80)	3.58	0.42	2.48
全波形冠层高度 RH85(CH75)	3.63	-0.07	2.52

注：括号内表示用于精度评价的CHM产品的最大、95%、90%、85%、80%、75%冠层高度。

NATIONAL REMOTE SENSING BULLETIN | 遥感学报

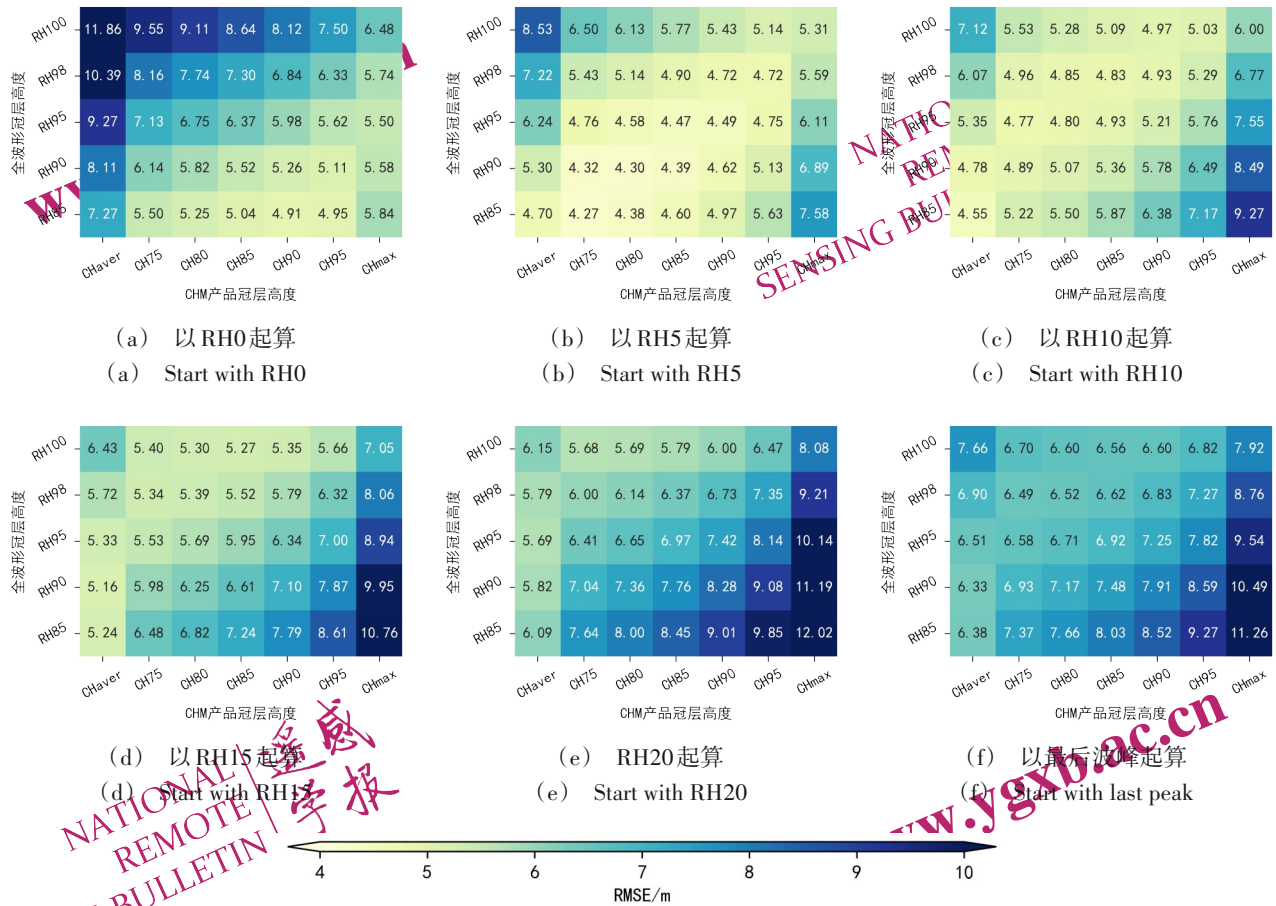


图 12 可变增益全波形不同RH指标计算的冠层高度中误差(4.5σ)

Fig. 12 The RMSEs of canopy height calculated by variable gain waveform with different RH metrics (4.5σ)

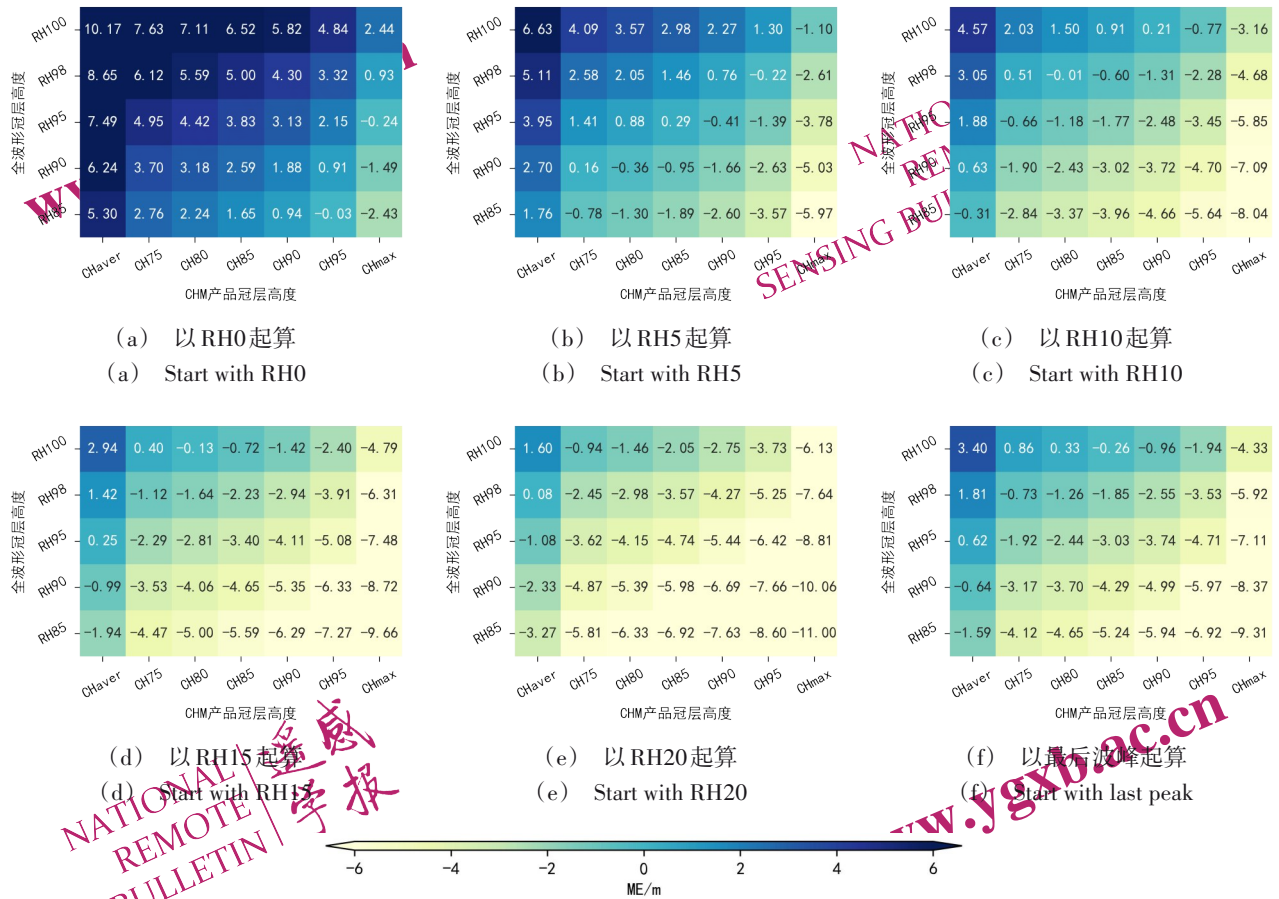


图 13 可变增益全波形不同RH指标计算的冠层高度误差均值(4.5σ)

Fig. 13 The MEs of canopy height calculated by variable gain waveform with different RH metrics (4.5 σ)

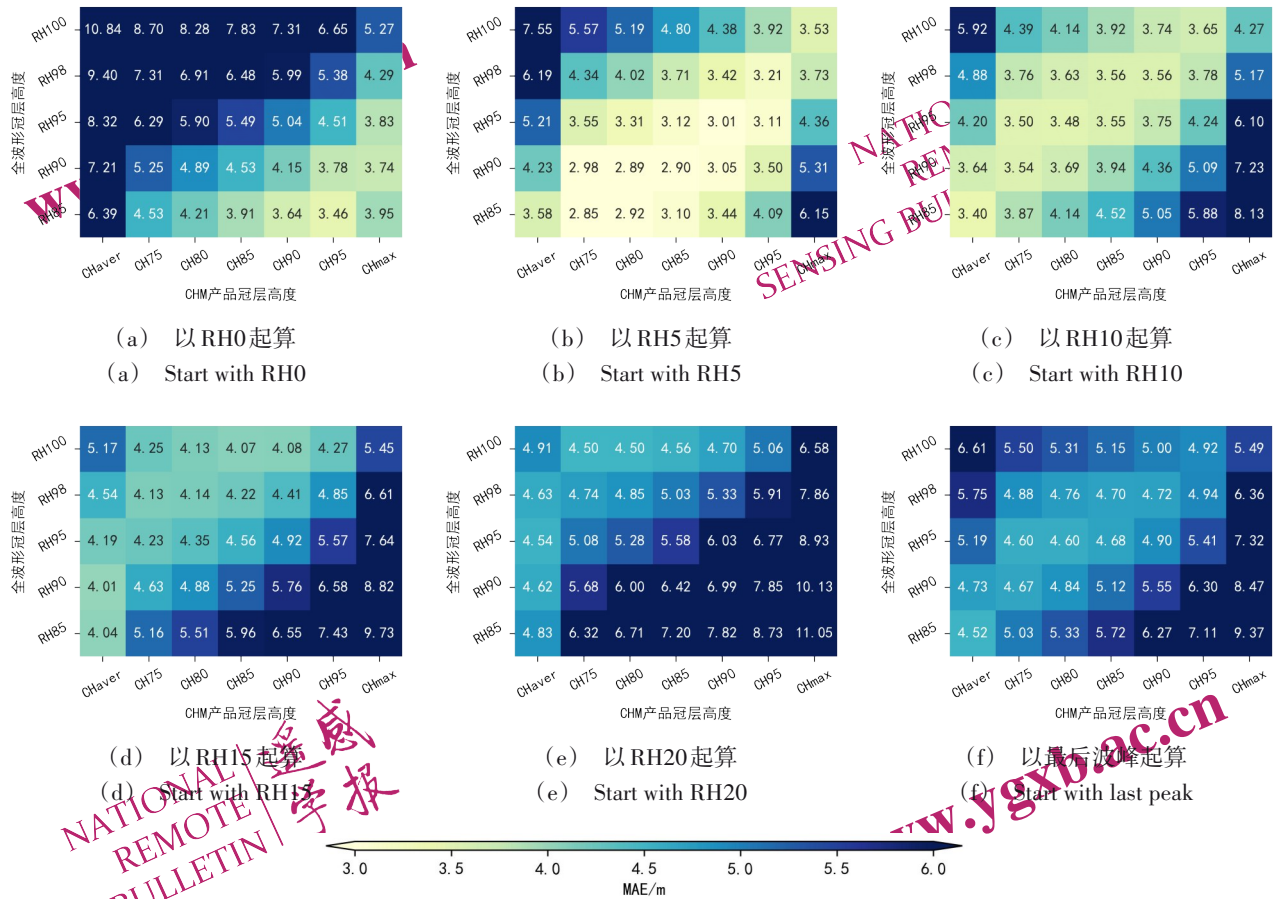


图 14 可变增益全波形不同 RH 指标计算的冠层高度平均绝对误差 (4.5σ)

Fig. 14 The MAEs of canopy height calculated by variable gain waveform with different RH metrics (4.5σ)

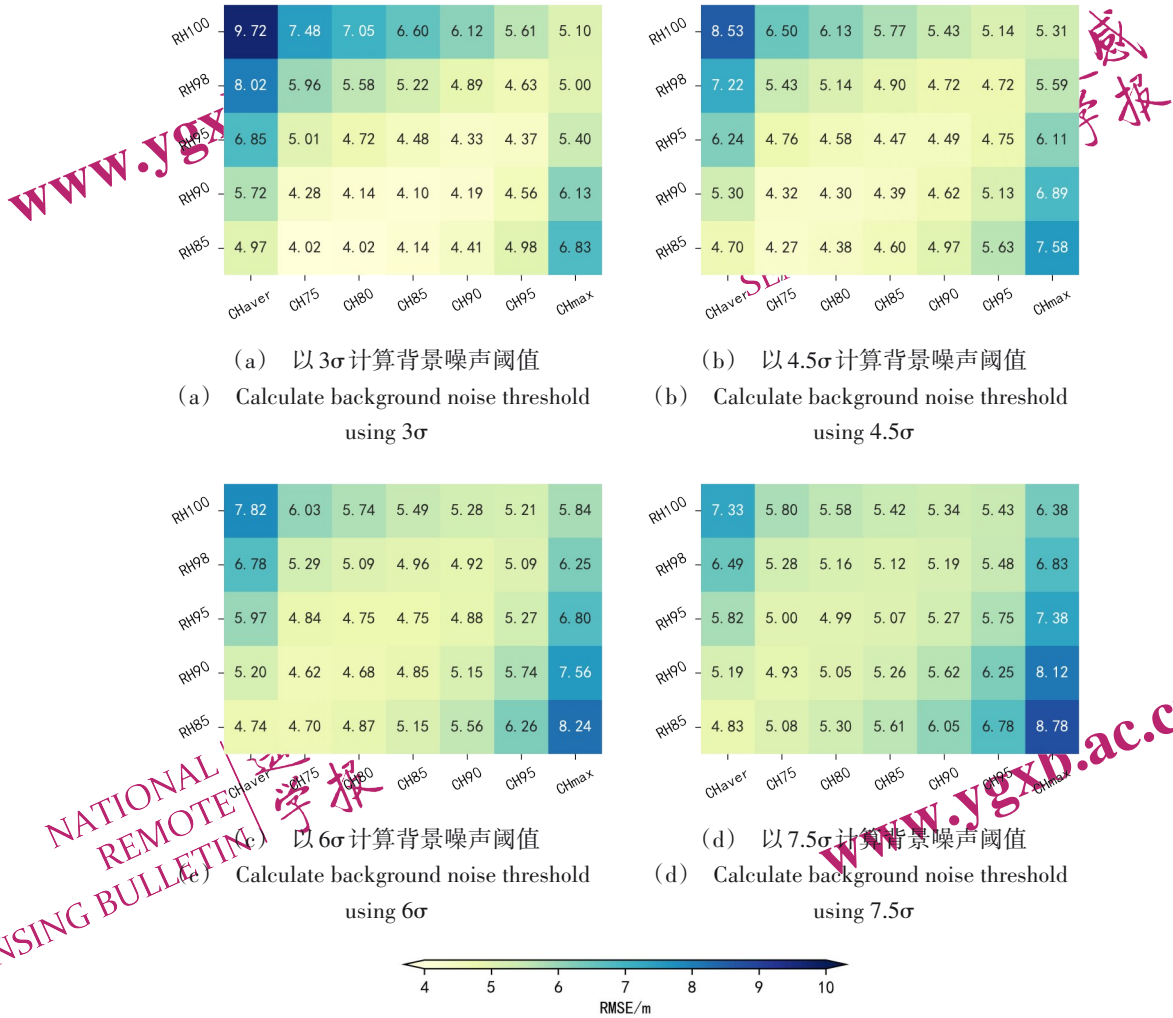


图 15 可变增益全波形不同背景噪声阈值计算的冠层高度中误差(RH5)

Fig. 15 The RMSEs of canopy height calculated with by variable gain waveform different thresholds of background noise (RH5)

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL REMOTE SENSING BULLETIN | 遥感学报

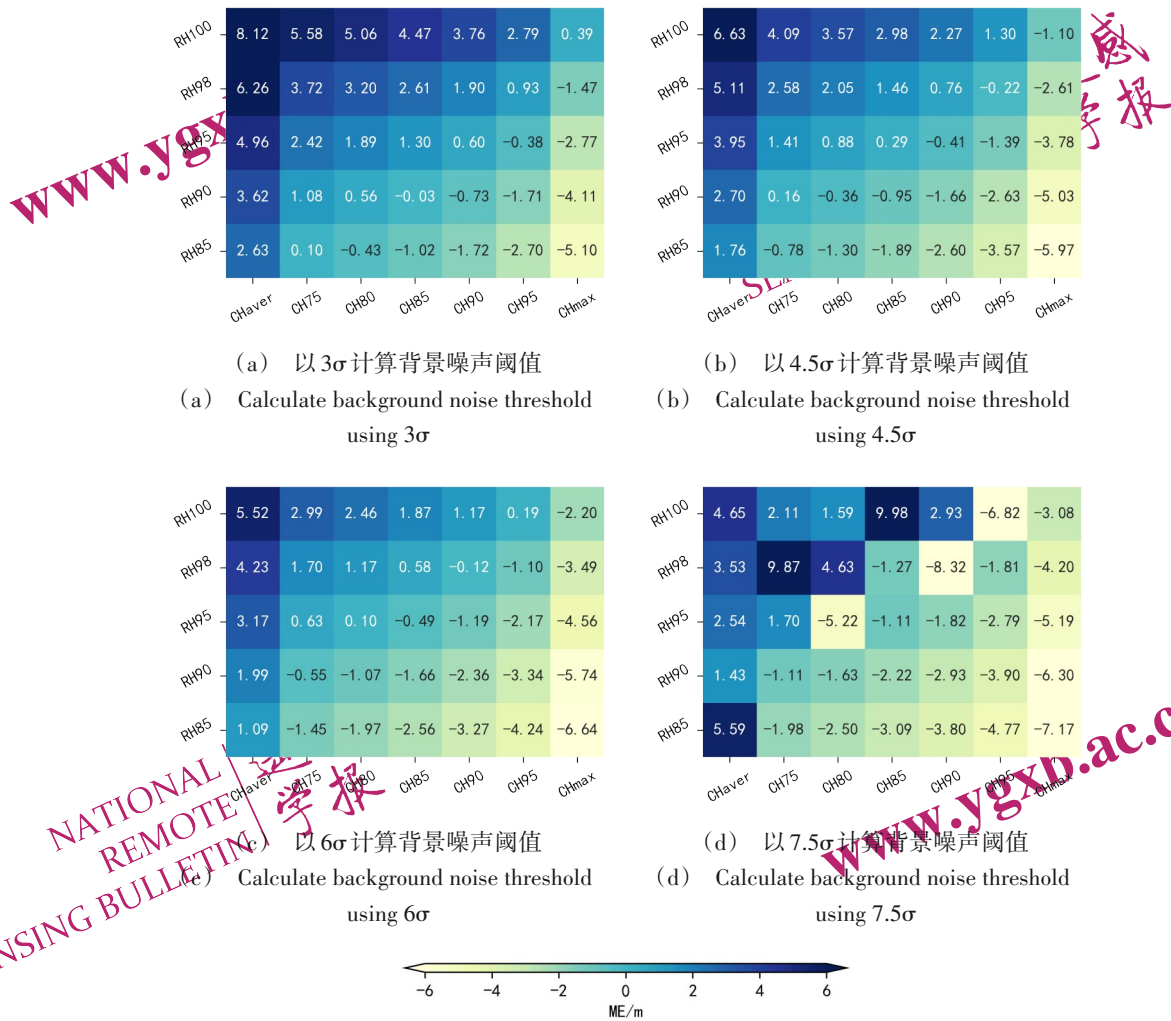


图 16 可变增益全波形不同背景噪声阈值计算的冠层高度中误差(RH5)

Fig. 16 The MEs of canopy height calculated with by variable gain waveform different thresholds of background noise (RH5)

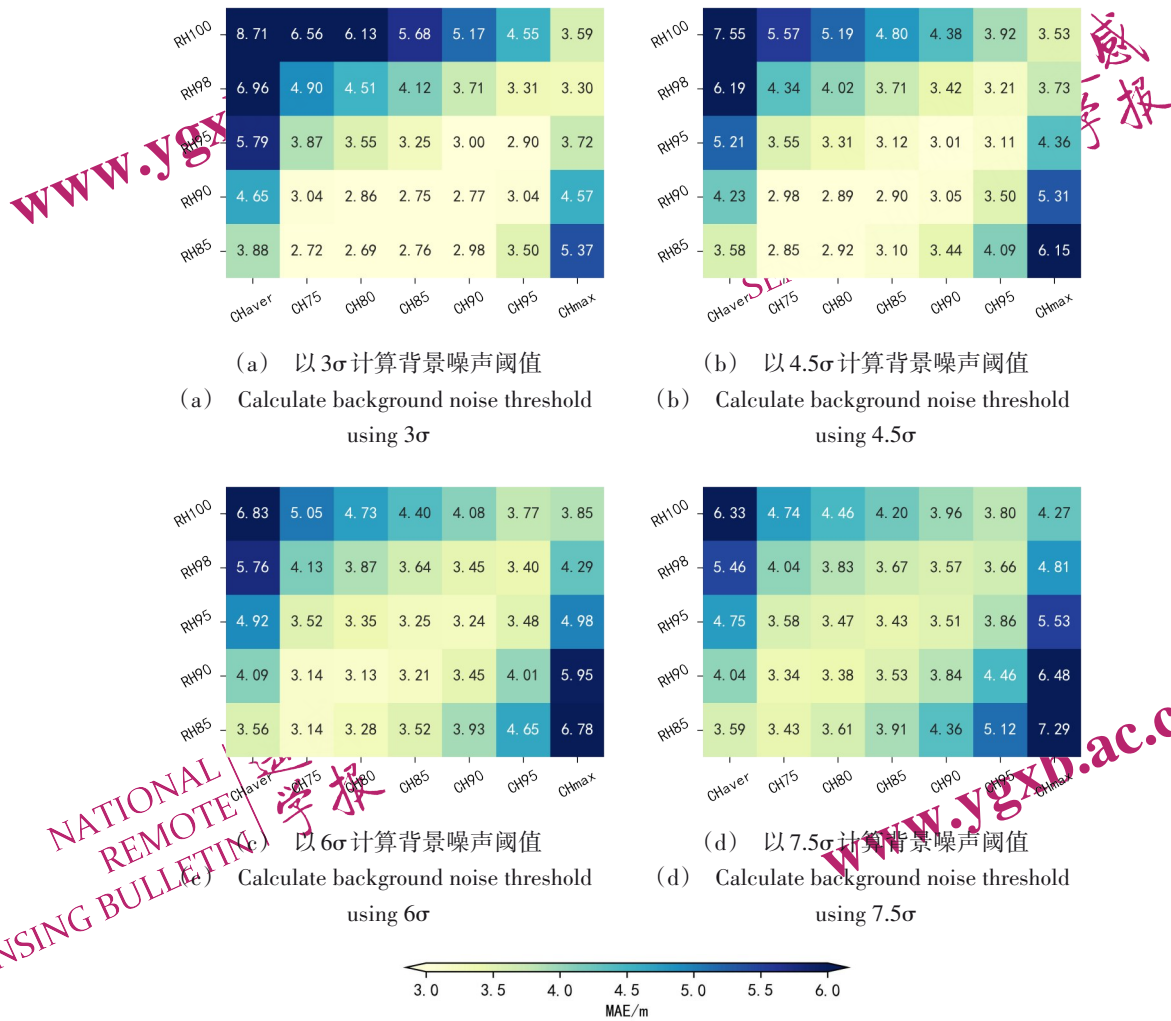


图 17 可变增益全波形不同背景噪声阈值计算的冠层高度中误差(RH5)

Fig. 17 The MAEs of canopy height calculated with by variable gain waveform different thresholds of background noise (RH5)

表 3 固定增益和可变增益全波形反演冠层高度精度对比表

Table 3 Comparison of canopy heights from waveform of fixed and variable gain

项目	固定增益			可变增益		
	RMSE	ME	MAE	RMSE	ME	MAE
全波形冠层高度 RH100(CHmax)	5.05	0.53	3.55	5.10	0.39	3.59
全波形冠层高度 RH98(CH95)	4.56	0.76	3.19	4.63	0.93	3.31
全波形冠层高度 RH95(CH90)	4.30	0.42	2.91	4.33	0.60	3.00
全波形冠层高度 RH90(CH85)	4.13	-0.21	2.70	4.10	-0.03	2.75
全波形冠层高度 RH85(CH80)	4.08	-0.61	2.66	4.01	-0.43	2.69
全波形冠层高度 RH85(CH75)	4.05	-0.09	2.68	4.02	0.10	2.72

注：括号内表示用于精度评价的 CHM 产品的最大、95%、90%、85%、80%、75% 冠层高度。

表4 不同地形条件下固定增益和可变增益全波形反演冠层高度精度

Table 4 Comparison of canopy heights from waveform of fixed and variable gain in different terrain

项目	地形	点数	固定增益						可变增益						
			RH5			最后波峰			RH5			最后波峰			
			RMSE	ME	MAE	RMSE	ME	MAE	点数	RMSE	ME	MAE	RMSE	ME	MAE
RH100	平地	277	5.36	0.17	4.06	5.27	0.68	3.93	291	5.88	-0.50	4.43	6.16	-2.02	4.40
	丘陵	1002	5.21	-0.43	3.64	5.29	-0.69	3.55	1005	5.71	-0.86	4.00	6.45	-2.74	4.25
	山地	4899	4.81	0.32	3.32	6.80	-2.07	4.74	4716	4.75	0.32	3.28	7.29	-3.42	4.91
	高山地	2015	5.53	1.58	4.04	7.68	-2.62	5.79	2014	5.46	1.33	4.02	8.47	-4.44	6.40
RH98	平地	277	4.02	1.22	3.00	3.89	0.70	2.68	291	4.39	1.02	3.29	4.32	-0.58	2.78
	丘陵	1002	4.45	0.50	3.16	4.81	-0.65	3.00	1005	4.83	0.41	3.48	5.38	-1.57	3.40
	山地	4899	4.36	0.47	3.00	6.73	-2.64	4.44	4716	4.35	0.73	3.06	6.96	-3.12	4.61
	高山地	2015	5.18	1.54	3.72	7.73	-3.43	5.74	2014	5.23	1.66	3.86	8.17	-4.25	6.19
RH95	平地	277	3.66	1.01	2.65	3.64	0.17	2.45	291	4.00	0.91	2.88	3.99	-0.69	2.45
	丘陵	1002	4.17	0.32	2.88	4.82	-1.09	2.97	1005	4.47	0.32	3.13	5.17	-1.69	3.22
	山地	4899	4.17	0.16	2.77	6.88	-3.08	4.47	4716	4.10	0.41	2.78	7.01	-3.46	4.61
	高山地	2015	4.81	1.04	3.37	7.92	-4.05	5.89	2014	4.84	1.15	3.51	8.32	-4.77	6.31
RH90	平地	277	3.44	0.54	2.41	3.64	-0.53	2.41	291	3.72	0.51	2.57	3.92	-0.11	2.38
	丘陵	1002	4.02	-0.29	2.72	5.05	-1.86	3.21	1005	4.25	-0.21	2.87	5.27	-2.26	3.35
	山地	4899	4.05	-0.42	2.59	7.17	-3.72	4.69	4716	3.93	0.18	2.58	7.27	-4.06	4.84
	高山地	2015	4.50	0.25	3.04	8.31	-4.84	6.21	2014	4.49	0.35	3.18	8.71	-5.58	6.65
RH85	平地	277	3.39	0.27	2.36	3.74	-0.95	2.41	291	3.60	0.28	2.50	3.94	-1.35	2.37
	丘陵	1002	4.02	-0.63	2.71	5.25	-2.27	3.40	1005	4.21	-0.52	2.79	5.42	-2.59	3.49
	山地	4899	4.03	-0.79	2.57	7.38	-4.10	4.90	4716	3.88	-0.56	2.53	7.46	-4.45	5.07
	高山地	2015	4.38	-0.24	2.93	8.56	-5.29	6.45	2014	4.35	-0.16	3.06	8.99	-6.08	6.94

5 结论

为更好地探测森林植被，陆碳监测卫星的载荷进行了针对性的优化设计，预期将在国家“双碳”战略、生态文明建设等方面发挥重要作用。本文利用全波形数据的RH指标，系统性地评价了陆碳监测卫星反演森林冠层高度的能力，主要有以下结论：

(1) 陆碳监测卫星激光全波形数据反演森林冠层高度以RH0为冠层高度起算基准，将明显高估冠层高度，仅提高计算背景噪声阈值的背景噪声标准差倍数有利于提高冠层高度精度，但效果有限，而以RH5为冠层高度起算基准将大大提升冠层高度精度，更大的RH起算基准如RH10以上，则会低估冠层高度。以RH5为冠层高度起算基准显著优于波形分解的最后波峰位置，并且受地形坡度的影响更小。

(2) 可变增益与固定增益全波形数据反演的冠层高度的精度相当，但计算背景噪声阈值的背景噪声标准差倍数比固定增益更小。固定增益宜采用6倍背景噪声标准差，可变增益宜采用3倍背景噪声标准差。陆碳监测卫星全波形可变增益和固定增益的配置有利于提升获取数据的有效率。

(3) 陆碳监测卫星全波形数据反演的冠层高度与足印范围内CHM产品的冠层高度有明显的线性关系。在选取合适的RH指标起算基准和背景噪声阈值后，全波形数据RH100、RH98、RH95、RH90、RH85反演的冠层高度分别与足印范围内CHM产品计算的100%、95%、90%、85%、80%冠层高度非常接近，并且全波形数据反演冠层高度的精度依次提高。

(4) 剔除少量异常激光点后，陆碳监测卫星全波形数据在无先验信息条件下森林冠层高度反演的RMSE在3.58m~4.23m之间，ME小于1.0m，

MAE 介于 2.52m~3.21m 之间。并且, 森林冠层高度反演的精度在平地区域最优, 丘陵和山地区域精度相当, 高山地区区域略差。

本文的结论有助于陆碳监测卫星激光测高数据在森林碳储量方面的研究。但是, 由于数据本身的因素包括获取时间差异导致地物变化、森林植被生长, 激光测高数据几何定位误差等的影响未能很好地评估, 给陆碳监测卫星激光测高数据反演森林冠层的精度带来不确定性, 这将是后续研究需要重点考虑的地方。

志 谢 本文使用的森林冠层高度产品、地形坡度产品均由加拿大魁北克省政府获取、处理和发布, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Adam M, Urbazaev M, Dubois C, et al. 2020. Accuracy assessment of GEDI terrain elevation and canopy height estimates in European temperate forests: influence of environmental and acquisition parameters. *Remote Sensing*, 12(23): 3948. [DOI: 10.3390/rs12233948.]
- Boudreau J, Nelson R F, Margolis H A, et al. 2008. Regional above-ground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3876-3890. [DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.003.]
- Chen J, Chen J. 2018. Globeland30: Operational global land cover map and big-data analysis. *Sci. China Earth Sci*, 61(10): 1533-1534. [DOI: 10.1007/s11430-018-9255-3.]
- Chen Xinyang, Long Xiaoxiang, Li Qingpeng, Li Jingmei, Han Qijin, Xu Zhaopeng, Yao Wei yuan. 2023. Data Processing and Accuracy Verification for Laser Altimeter of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-18 (陈新阳, 龙小祥, 李庆鹏, 等. 2023. 陆地生态系统碳监测卫星激光数据处理与精度验证. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 1-18. [DOI: 10.13203/j.whugis.20230110])
- Dhargay S, Lyell C S, Brown T P, et al. 2022. Performance of GEDI space-borne lidar for quantifying structural variation in the temperate forests of south-eastern Australia. *Remote Sensing*, 14(15): 3615. [DOI: 10.3390/rs14153615.]
- Du L, Pang Y, Ni W, et al. 2023. Forest terrain and canopy height estimation using stereo images and spaceborne LiDAR data from GF-7 satellite. *Geo-spatial Information Science*, 1-11. [DOI: 10.1080/10095020.2023.2249037.]
- Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of remote sensing*, 1: 100002. [DOI: 10.1016/j.srs.2020.100002.]
- Hofton M A, Minster J B, Blair J B. 2000. Decomposition of laser altimeter waveforms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38(4): 1989-1996. [DOI: 10.1109/36.851780.]
- Hofton M, Blair J B, Story S. 2019. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for GEDI Transmit and Receive Waveform Processing for L1 and L2 Products. GEDI ATBD, Version 1.0: [2022-08-20] https://lpdaac.usgs.gov/documents/581/GEDI_WF_ATBD_v1.0.pdf
- Lefsky M A, Keller M, Pang Y, et al. 2007. Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1): 013537. [DOI: 10.1117/1.2795724]
- LI G Y, TANG X M, CHEN J Y, et al. 2021. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 50(10): 1338-1348. (李国元, 唐新明, 陈继溢, 等. 2021. 高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证. *测绘学报*, 50(10): 1338-1348. [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210025.]
- Li X, Wessels K, Armston J, et al. 2023. First validation of GEDI canopy heights in African savannas. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113402. [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113402.]
- Liu A, Cheng X, Chen Z. 2021. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112571. [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112571.]
- Liu L J, Wang C, Nie S, et al. 2022. Analysis of the influence of different algorithms of GEDI L2A on the accuracy of ground elevation and forest canopy height. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 39(4): 502-511. (刘丽娟, 王成, 聂胜, 等. 2022. GEDI L2A 不同算法对地面高程和森林冠层高度精度的影响分析. *中国科学院大学学报*, 39(4): 502-511.)
- Ngo Y N, Ho Tong Minh D, Baghdadi N, et al. 2023. Tropical forest top height by GEDI: From sparse coverage to continuous data. *Remote Sensing*, 15(4): 975. [DOI: 10.3390/rs15040975.]
- Park T, Kennedy R E, Choi S, et al. 2014. Application of physically-based slope correction for maximum forest canopy height estimation using waveform lidar across different footprint sizes and locations: Tests on LVIS and GLAS. *Remote Sensing*, 6(7): 6566-6586. [DOI: 10.3390/rs6076566.]
- Rosette J A B, North P R J, Suarez J C. 2008. Vegetation height estimates for a mixed temperate forest using satellite laser altimetry. *International journal of remote sensing*, 29(5): 1475-1493. [DOI: 10.1080/01431160701736380]
- Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. 2005. Overview of the ICESat mission. *Geophysical research letters*, 32(21). [DOI: 10.1029/2005GL024009]
- Tang X, Li W, Liu R, et al. 2020. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission. *Earth and Space Science*, 7(1): e2019EA000777. [DOI: 10.1029/2019EA000777]
- User's Guide: Products Derived from LiDAR Data - 2nd edition. [2023-12-04]. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forest/users-guide-lidar.pdf>
- Wang Y, Zhang J, Liu D, et al. 2018. Accuracy assessment of Globe-

Land30 2010 land cover over China based on geographically and categorically stratified validation sample data. *Remote Sensing*, 10(8): 1213. [DOI: 10.3390/rs10081213].

ZHANG Xinwei, HUANG Jin, HE Tao, et al. 2022. Overall Design of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 43(6): 16-26. (张新伟, 黄缙, 贺涛, 等. 2022. 陆地生态系统碳监测卫星总体设计. *航天返回与遥*

感, 43(6): 16-26.)

Zhou G, Long S, Xu J, et al. 2021. Comparison analysis of five waveform decomposition algorithms for the airborne LiDAR echo signal. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 7869-7880. [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3096197].

Accuracy Analysis of Forest Canopy Height from Waveform LiDAR of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite (TECIS): A Case Study of Temperate Coniferous-broadleaved Mixed Forest in Quebec, Canada

Chen Jiyi¹, Li Guoyuan^{1,2*}, Peng Jun^{1,3}, Liu Zhao¹, Zhou Xiaoqing^{1,2}

1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing, 100048, China;

2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing, 210023, China;

3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: The Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite (TECIS) is China's first remote sensing satellite with space-borne LiDAR as the main payload, which aims at quantitatively monitoring of terrestrial ecosystem carbon storage, forest resources and forest productivity, and serving the goals of "carbon peaking and carbon neutrality" and the monitoring and evaluation of major projects for the protection and restoration of important ecosystems in China. In this paper, the ability of different relative height (RH) metrics to characterize the forest canopy height was evaluated in detail for the full waveform data of the multi-beam LiDAR onboard the Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite. Canopy heights were calculated using RH0, RH5, RH10, RH15, RH20 and last peak location as the benchmark. Different percent canopy height determined by RH100, RH95, RH90, RH85 and RH80 were obtained and compared to canopy height model (CHM) generated by airborne LiDAR data to explore the correlation between RH percent canopy height and CHM. The ability in canopy height detection between fixed-gain and variable-gain full-waveform was compared. Moreover, the influence of slope on canopy height extraction was analyzed. Six tracks of multi-beam LiDAR L2B data products from the Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite passing the test area of temperate coniferous-broadleaved mixed forest in Quebec, Canada, were selected for analysis. The results show that the canopy height is overestimated significantly when RH0 is used as the benchmark of canopy height calculation, and the accuracy of canopy height is improved by increasing the background noise threshold with reference to the noise standard deviation, but the effect is limited. As for the fixed-gain waveforms, using RH5 as the benchmark, and identifying the threshold of background noise by 6 times the standard deviation of background noise, the accuracy of different percentage of forest canopy heights achieves RMSEs of between 3.58 m-4.23 m, MEs of less than 1.0 m and MAEs of between 2.52 m-3.21 m, respectively. The accuracy of retrieval canopy heights using variable-gain and fixed-gain full waveform data is comparable, but the times of background noise standard deviation for calculating background noise threshold is smaller than that of fixed gain. Start from RH5 and using proper background noise threshold, the canopy heights retrieved by RH100, RH98, RH95, RH90 and RH85 from both variable-gain and fixed-gain full waveform data were close to the 100%, 95%, 90%, 85% and 80% canopy height from CHM products within the footprint range, respectively. Moreover, using RH5 as the benchmark of canopy height is significantly better than the last peak position derived from waveform decomposition, and is less affected by terrain slope. The configuration of variable and fixed gains is beneficial for enhancing data effectiveness in forest areas. The conclusions will be helpful for the application of the laser altimetry data of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite in forest canopy height retrieval.

Key words: Satellite Laser Altimetry, Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite, Waveform LiDAR, Forest Canopy Height, Relative Height Metrics, Background noise threshold, Terrain slope, Canopy Height Model

Supported by Supported by the Demonstration study on the Application of Space-Earth Integration of Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite (BM2312).