

基于 ICESat-GLAS 的坡地最大树高估测模型比较研究

王蕊<sup>1</sup>, 邢艳秋<sup>2\*</sup>, 尤号田<sup>3</sup>

(1. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040;  
3. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**地形坡度对星载 LiDAR(light detection and ranging)估测最大树高具有较大的影响。为了提高坡度条件下树高的反演精度,通过建立坡地条件下 5 种不同的最大树高估测模型,前 3 个模型分别使用不同 DEM(digital elevation model)数据的地形指数来量化地形坡度的 Xing 模型,第 4 个模型使用波形参数-未改进边缘长度来量化地形坡度,第 5 个模型与第 4 个模型类似,用改进边缘长度来替换未改进边缘长度。结果可知,波形参数模型的精度要高于使用 DEM 数据的地形指数的 Xing 模型的精度,第 5 个模型的精度要高于第 4 个模型的精度。表明波形参数量化地形坡度的能力要优于 DEM 数据的地形指数,而改进边缘长度模型更适合估测坡地的最大树高。

**关键词:**星载 LiDAR;ICESat-GLAS;坡地;最大树高;树高模型

**中图分类号:**S771.8      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2019)03-0154-07

Comparison of ICESat-GLAS-based Estimation Models of Maximum Tree Height under Slope Terrain Condition

WANG Rui<sup>1</sup>, XING Yan-qi<sup>2\*</sup>, YOU Hao-tian<sup>3</sup>

(1. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, Shandong, China;  
2. Center for Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;  
3. School of Mapping and Geographic Information, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** There is a great influence from the terrain slope in estimating the maximum tree height using spaceborne LiDAR (light detection and ranging). To improve the accuracy under the slope conditions, five different models for estimating the maximum tree height were proposed in this paper. The first three models were based on Xing's model, using the topographic index of different DEM (digital elevation model) data to quantify the terrain slope. The fourth model used the waveform parameter, original edge length, to quantify the terrain slope. Lastly, the fifth model was similar to the fourth, using improved edge length to replace the original. By analyzing the results of above-mentioned 5 models, it was found that the forth and fifty models based on the waveform parameter were with significantly higher accuracy than those of the first three models based on the topographic index of DEM data. Furthermore, the fifth model was with a better performance compared with the fourth. This investigation showed that waveform parameters, especially optimized edge length, were more capable than using the terrain index of DEM data to accurately assess the maximum tree height, due to its advantage in quantifying the terrain slope.

**Key words:** spaceborne LiDAR; ICESat-GLAS; slope terrain; maximum tree height; model of tree height

收稿日期:2018-08-23    修回日期:2018-11-12  
基金项目:博士科研启动费(50004910)。  
作者简介:王蕊,女,讲师,研究方向:遥感技术及其应用。E-mail:wangrui19890908@126.com  
\* 通信作者:邢艳秋,女,教授,博士生导师,研究方向:林业定量遥感。E-mail:yanqixing@nefu.edu.cn

树高作为众多的森林结构参数之一,既是评价林分垂直结构的重要指标,也是反映林地生产力高低的主要因子<sup>[1]</sup>。近些年发展迅速的激光雷达技术已在全球多个区域进行了广泛应用<sup>[2-7]</sup>,而星载大光斑激光雷达可以高精度获得地表物体高度信息<sup>[8-9]</sup>,对森林及林下地形均有较强的探测能力,尤其是树高。而对于最大树高来说,ICESat-GLAS 的起波点是树梢的位置,止波点是地面的位置,所以能高精度反演最大树高。此外相对均质的林分内,最大树高与林分生物量有一定的相关性,能反映林分的生长质量。但星载 LiDAR 光斑内会同时包含森林及地面信息,那么地面的地形坡度就会干扰回波波形中冠层及地面回波的正确辨别,影响坡度地形上树高的准确估测。庞勇<sup>[10]</sup>等研究发现,ICESat-GLAS 波形长度与地面坡度的关系呈近似线性正相关,说明地形坡度影响可以被校正。为消除地形坡度对树高反演的影响,M. A. Lefsky<sup>[11]</sup>等利用 ICESat-GLAS 数据中的波形长度与 SRTM 中的地形指数对最大树高进行了估测,在模型中假设波形长度和地形指数与最大树高是线性关系。该模型中的地形指数类似于庞勇<sup>[10]</sup>等所提的坡度因子;鉴于不同的地形起伏和森林类型,Y. Q. Xing<sup>[12]</sup>等在 M. A. Lefsky<sup>[11]</sup>等模型的基础上提出一个改进模型,在改进模型中,最大树高与波形长度的关系为对数,而与地形指数的关系为线性。结果表明,改进后模型的最大树高估测结果要好于前者。以上研究均使用 DEM 数据来量化地形坡度,在没有辅助地形数据 DEM 的情况下,M. A. Lefsky<sup>[13]</sup>等提出以边缘长度来对地形坡度进行描述,并将边缘长度进行多重转换后,开发出一个校正因子对平均树高进行估测。但 Y. Pang<sup>[14]</sup>等提出 M. A. Lefsky 模型<sup>[13]</sup>尤其在波形长度较小的情况下不能准确地估测出树高,同时开发了一个基于非线性边缘长度的树高反演模型。后来 C. Hilbert<sup>[15]</sup>等指出改进边缘长度对地形坡度能够有效地表征,尤其是在回波波形中冠层峰值强度和地面峰值强度的差异较大时,这一改进边缘长度还未应用到树高估测模型中。

为提高坡地内最大树高的估测精度,本研究探索了 M. A. Lefsky<sup>[13]</sup>等所提的边缘长度在最大树高估测方面的应用潜力,同时利用 C. Hilbert<sup>[15]</sup>等提出的改进边缘长度对坡地最大树高进行了估测,以探索其在最大树高估测中的应用价值。在之前的研究中,是基于一定空间分辨率的 DEM 数据来比较波形参数和地形指数量化地形坡度的能力<sup>[16]</sup>,并没有探究过不同空间分辨率 DEM 数据的地形指数,所以本研究比较了不同空间分辨率的 DEM 数

据(ASTER GDEM 和 SRTM DEM 数据)所求出的地形指数和波形参数分别量化地形坡度的能力。最后比较分析 5 个最大树高模型的估测结果,找出更为适合估测坡地最大树高的模型。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域概况

研究区是吉林汪清林业局经营区(43°05′—43°40′N,129°56′—131°04′E)(图 1),该区面积 30.4 万 hm<sup>2</sup>。地面高程 360~1 477 m,地形坡度 0°~45°,年平均气温 3.9℃左右。该区为天然林,生态结构复杂,植物种类繁多,其中针叶树主要有云杉(*Picea asperata*)、红松(*Pinus koraiensis*)和臭松(*Abies nephrolepis*)等,其中阔叶树主要有蒙古栎(*Quercus mongolica*)、椴树(*Tilia tuan*)、色木(*Acer mono*)、枫桦(*Betula costata*)和白桦(*B. platyphylla*)等。

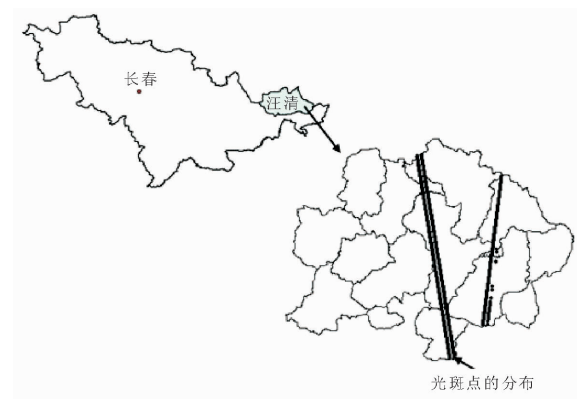


图 1 研究区位置和星载大光斑的分布  
Fig. 1 Location of study area and distribution of spaceborne large footprint

## 1.2 研究方法

1.2.1 ICESat-GLAS 数据获取 ICESat (ice, cloud and land elevation satellite)/GLAS (geoscience laser altimetry system)系统是 EOS(earth observation system)计划的一部分,是首个用于全球连续观测的星载激光测高系统,主要任务是测量极地冰盖的高程变化、大气的云剖面 and 气溶胶的性质、基于全球基准面的陆地地形剖面和植被的冠层高度<sup>[17]</sup>。其飞行高度 600 km,可覆盖地表 86°N~86°S 之间及两极大部分的区域,回归周期 183 d,赤道附近的相邻轨道间距 15 km,而纬度 80°处的间距 2.5 km。ICESat-GLAS 激光器发射脉冲的个数为 40 个·s<sup>-1</sup>,激光脉冲地面上的光斑直径约 66 m,相邻光斑之间的间距约 170 m。

ICESat-GLAS 数据产品共有 15 种:GLA01 数据产品、GLA02 数据产品、...、GLA14 数据产品、GLA15 数据产品,均可在美国国家冰雪数据中心

(<http://nsidc.org/data/ice-at/>)获取,对于本研究区获取的是 GLA01 数据产品和 GLA14 数据产品,时间范围为 2003—2009 年,共 3 512 组光斑数据。GLA01 是全球测高数据产品,记录的是完整波形数据,该数据对应于地面光斑内地物;GLA14 是陆地测高数据产品,记录的是地理位置与高程信息,对应于 GLA01 波形数据的光斑内地物。

1.2.2 地面数据采集与分析 地面数据采集前,叠加 DEM 数据生成的坡度图和 GLAS 激光光斑的地理位置分布图,分析发现将近所有的 ICESat-GLAS 光斑的地理位置在研究区内所处的地形坡度 $\leq 25^{\circ}$ ,因此将该坡度范围内的数据划分成 5 组: $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 、 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 和  $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。地面数据采集时,调查样地选择的是 GLAS 激光光斑所在的位置,使用 GPS 进行光斑地理定位并将其坐标记录下来。地面样点中心选取的是 ICESat-GLAS 的激光光斑中心,以此建立圆形地面调查样地,其在水平方向上的投影面积是  $500\text{ m}^2$ ,并将该样地内的最大树高及地表信息进行测量和记录(略)。针对该研究区共设置了 183 个地面调查样地。

1.2.3 ICESat-GLAS 波形数据处理 对获取的 ICESat-GLAS 原始波形数据首先做预处理,为下面的提取波形参数做准备。具体处理过程见参考文献[18]。

1.2.4 ICESat-GLAS 波形参数提取 对经过预处理

后的 ICESat-GLAS 波形数据提取波形参数,提取了 5 个波形参数:波形长度( $W_{\text{ext}}$ )、未改进的前缘长度( $\text{Lead}_{\text{ext}}$ )及后缘长度( $\text{Trail}_{\text{ext}}$ )、改进的前缘长度( $\text{Lead}_{\text{mod}}$ )及后缘长度( $\text{Trail}_{\text{mod}}$ )。 $W_{\text{ext}}$  定义为回波波形中超过 Threshold(背景噪声阈值)的信号开始高程值和信号结束高程值的差值,该参数与树高具有密切关系; $\text{Lead}_{\text{ext}}$  定义为超过 Threshold 的信号开始高程值和最大回波强度 1/2 处的第 1 个高程值的差值,可反映树高变化; $\text{Trail}_{\text{ext}}$  定义为超过 Threshold 的信号结束高程值与最大回波强度 1/2 处的最后 1 个高程值的差值,该参数和地形坡度有很大关系; $\text{Lead}_{\text{mod}}$  定义为超过 Threshold 的信号开始高程值与冠层波峰中心高程值的差值,也可反映树高变化; $\text{Trail}_{\text{mod}}$  定义为超过 Threshold 的信号结束高程值与地面波峰中心高程值的差值,该参数和地形坡度也有很大关系。各波形参数见图 2。

1.2.5 DEM 数据 本研究使用了 3 类 DEM 数据:自定义 DEM 数据;ASTER GDEM DEM 数据;SRTM DEM 数据。DEM 数据的作用主要有 2 个:生成地形坡度图,用以计算 ICESat-GLAS 激光光斑点位置的坡度值;提取地形指数( $g$ ),用以进行地形坡度的量化。地形指数的具体提取方式为:计算以 GLAS 光斑的中心点所处 DEM 像元为核心的矩形  $3\times 3$  窗口内最大的高程和最小的高程之差,该值就作为 DEM 中的地形指数值。

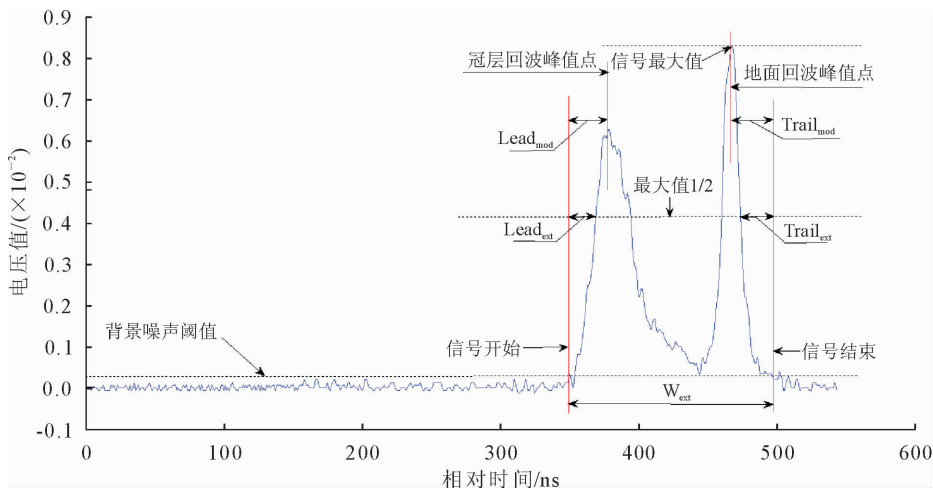


图 2 各波形参数图示

Fig. 2 Diagram of various waveform parameters

1.2.6 树高估测模型 对于所设置的 5 类坡度组,分别采用 6 个模型来估测树高。其中模型(1)、(2)和(3)均为 Y. Q. Xing<sup>[12]</sup>模型,该模型以地形指数来量化坡度因子;模型(4)为使用边缘长度来描述地形坡度的线性模型,是为探索 M. A. Lefsky<sup>[13]</sup>等所提的边缘长度在最大树高估测方面的应用潜力;模型

(5)是为检验 M. A. Lefsky<sup>[13]</sup>等所提的边缘长度在平均树高估测中的结果,并与模型(4)的结果做对比;模型(6)将 C. Hilbert<sup>[15]</sup>等提出的改进边缘长度应用到了树高估测中,以探索改进边缘长度在最大树高估测方面的应用价值。对比分析模型(1)、(2)、(3)、(4)、(6)的最大树高估测结果,从而找出更为适

合估测地形坡地最大树高的模型。

$$H_1=a_1(\ln W_{ext}+b_1g_1)+c_1 \tag{1}$$

$$H_2=a_2(\ln W_{ext}+b_2g_2)+c_2 \tag{2}$$

$$H_3=a_3(\ln W_{ext}+b_3g_3)+c_3 \tag{3}$$

$$H_4=a_4\ln W_{ext}+b_4Lead_{ext}+c_4Trail_{ext}+d_1 \tag{4}$$

$$\bar{H}_5=a_5\ln W_{ext}+b_5Lead_{ext}+c_5Trail_{ext}+d_2 \tag{5}$$

$$H_6=a_6\ln W_{ext}+b_6Lead_{mod}+c_6Trail_{mod}+d_3 \tag{6}$$

式中,  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $H_4$  和  $H_6$  分别为最大树高(m);  $\bar{H}_5$  为平均树高(m);  $g_1$ 、 $g_2$  和  $g_3$  分别为从自定义 DEM、ASTER GDEM 和 SRTM DEM 数据中提取的地形指数。

## 2 结果与分析

基于所获取的 3 512 个光斑的 GLA14 数据, 分析 GLAS 高程和自定义 DEM 高程之间的关系, 发现两者的相关系数为 0.99, RMSE 为 0.016 m, 根据 C. C. Carabjal<sup>[19]</sup> 等和 G. Sun<sup>[20]</sup> 等的描述, 该结果能够证明 GLAS 所记录的光斑地理位置的误差很小, 可忽略不计。

本研究将 183 组地面数据进行组合, 分别为 0°~5°、0°~10°、0°~15°、0°~20° 和 0°~25° 5 个累积坡度组, 并将这 5 个组合的数据分成 2 组(表 1), 一组进行树高估测模型的构建, 另一组进行树高估测模型的检验。

表 2 分别为使用 6 个树高估测模型在 5 个累积坡度组的回归结果。通过分析比较表 2 中 5 个最大树高估测模型的回归分析结果, 发现波形参数的线性模型的精度要高于使用 DEM 数据的地形指数的 Xing 模型的精度, 说明波形参数量化地形坡度的能力要优于 DEM 数据的地形指数。

表 1 构建和检验森林参数估测模型的样本数

Table 1 Sample number to build and test forest parameter estimation model

累积坡度组	构建模型样本数	检验模型样本数
0°~5°	35	18
0°~10°	60	32
0°~15°	82	44
0°~20°	106	56
0°~25°	120	63

比较模型(1)、(2)、(3)的最大树高估测结果, 总体上模型(3)的结果最好, 精度最高, 说明相对于从自定义 DEM 数据和 ASTER GDEM 数据中提取的地形指数, 从 SRTM DEM 数据中提取的地形指数量化地形坡度的能力更强。

比较分析模型(4)、(5)的回归结果, 发现在 5 个累计坡度组内, 模型(4)的估测精度均明显高于模型

(5), 在 0°~5°、0°~10°、0°~15°、0°~20° 和 0°~25° 内, 精度差异分别为 0.30、0.24、0.24、0.23 和 0.21, 说明 M. A. Lefsky<sup>[13]</sup> 等所提的未改进的边缘长度能够更好地估测坡地的最大树高, 而对于坡地的平均树高的估测结果相对较差。从而说明 M. A. Lefsky<sup>[13]</sup> 等所提的未改进的边缘长度在坡地内的最大树高估测方面有很好的应用价值。

比较模型(4)和模型(6)的最大树高估测结果, 总体后者优于前者, 说明改进边缘长度能够更好地对坡地最大树高进行估测。在 0°~5°、0°~10°、0°~15°、0°~20° 和 0°~25° 内, 精度差异分别为 0.02、0.02、0.03、0.01 和 0.01, 发现随着地形坡度的增加, 2 个模型的精度差有先增大后减小的现象。分析原因可能有两方面: 地形坡度越大, 回波波形越被展宽, 从而使波形长度越大, 除此之外植被与地面的峰值也会降低, 可能使冠层峰值点的强度或地面峰值点的强度和最大强度的一半处的第一个高程值的强度或最后一个高程值的强度很接近, 从而使未改进边缘长度与改进边缘长度两者的值非常接近; 随着地形坡度的增大, 冠层回波和地面回波会发生叠加, 可能会导致冠层回波峰值强度和地面回波峰值强度的差异很小, 而改进的边缘长度在两者强度差异较大时较为实用。

通过分析可知, 在 5 个估测坡地内最大树高的模型中, 模型(6)的回归结果最好, 精度最高, 说明相对于其他模型, 该模型最适合估测坡地的最大树高。

使用独立数据对 6 个不同的模型进行验证, 预估精度  $P$ , 并最终选择最优模型, 模型验证结果见表 3。

$$P=1-\frac{|H-\hat{H}|}{H} \tag{7}$$

式中,  $H$  为树高(m);  $\hat{H}$  为树高估测值(m)。

通过比较表 3 中 5 个坡地内最大树高估测模型的验证结果, 发现模型(6)的验证精度最高, 也说明该模型是估测坡地最大树高的最优模型。

由表 3 模型验证结果可知, 真实值和预测值之间仍存在一定的差异, 分析其可能存在的原因: 1) 数据获取时间差异。ICESat-GLAS 的部分数据获取的时间是 11 月, 这时落叶树已落叶, 该树所反射回的首次回波来自树冠, 并不是树叶, 但地面数据获取时间是 9 月, 而这时落叶树并未落叶, 所以数据获取时间差异导致可能会使真实值和预测值之间存在一定的差异。2) 林下废弃物的存在。林下存在的一些废弃物(人为垃圾、落叶、倒木或枯枝)可能导致脉冲发生多次散射<sup>[21-22]</sup>, 同时还会影响林下地表的精确探测, 并且废弃物还依赖于其本身的光谱特性、三维分布和厚度<sup>[23]</sup>。3) 土壤湿度。因为土壤具有一定

表 2 5 个累积坡度组的树高模型对比

Table 2 Model comparison of tree height over five cumulative slope categories

累积坡度组	样本数	估测模型	$R^2$	平均误差
0°~5°	35	$14.149(\ln W_{ext} + 0.014g_1) - 27.244$	0.87	2.77
		$16.530(\ln W_{ext} - 0.020g_2) - 30.028$	0.87	2.86
		$15.006(\ln W_{ext} + 0.0005g_3) - 28.801$	0.87	2.97
		$11.237\ln W_{ext} + 0.448Lead_{ext} - 0.423Trail_{ext} - 22.048$	0.90	2.39
		$12.058\ln W_{ext} + 0.113Lead_{ext} - 0.890Trail_{ext} - 22.792$	0.60	3.50
		$16.208\ln W_{ext} + 0.129Lead_{mod} - 0.610Trail_{mod} - 30.402$	0.92	2.12
0°~10°	60	$14.086(\ln W_{ext} + 0.003g_1) - 26.286$	0.80	3.03
		$14.125(\ln W_{ext} + 0.002g_2) - 26.431$	0.81	3.11
		$14.508(\ln W_{ext} - 0.0008g_3) - 26.903$	0.81	3.11
		$17.994\ln W_{ext} - 0.122Lead_{ext} - 0.556Trail_{ext} - 34.093$	0.84	2.84
		$12.957\ln W_{ext} - 0.056Lead_{ext} - 0.579Trail_{ext} - 24.443$	0.60	3.73
		$16.482\ln W_{ext} - 0.036Lead_{mod} - 0.603Trail_{mod} - 29.963$	0.86	2.77
0°~15°	82	$12.672(\ln W_{ext} + 0.003g_1) - 21.947$	0.70	3.40
		$12.957(\ln W_{ext} - 0.0006g_2) - 22.447$	0.70	3.46
		$13.671(\ln W_{ext} - 0.003g_3) - 23.336$	0.71	3.42
		$15.753\ln W_{ext} - 0.063Lead_{ext} - 0.422Trail_{ext} - 28.546$	0.74	3.10
		$9.929\ln W_{ext} + 0.086Lead_{ext} - 0.434Trail_{ext} - 17.474$	0.50	3.80
		$15.176\ln W_{ext} - 0.188Lead_{mod} - 0.359Trail_{mod} - 25.947$	0.77	2.94
0°~20°	106	$11.535(\ln W_{ext} - 0.001g_1) - 18.676$	0.63	3.47
		$12.260(\ln W_{ext} - 0.005g_2) - 20.072$	0.64	3.49
		$12.950(\ln W_{ext} - 0.005g_3) - 20.651$	0.66	3.41
		$15.332\ln W_{ext} - 0.048Lead_{ext} - 0.506Trail_{ext} - 27.442$	0.69	3.18
		$10.623\ln W_{ext} + 0.031Lead_{ext} - 0.475Trail_{ext} - 18.845$	0.46	3.93
		$13.900\ln W_{ext} - 0.149Lead_{mod} - 0.327Trail_{mod} - 23.006$	0.70	3.16
0°~25°	120	$11.367(\ln W_{ext} - 0.001g_1) - 18.017$	0.60	3.53
		$11.790(\ln W_{ext} - 0.003g_2) - 18.844$	0.60	3.57
		$12.625(\ln W_{ext} - 0.004g_3) - 19.845$	0.62	3.49
		$15.261\ln W_{ext} - 0.082Lead_{ext} - 0.505Trail_{ext} - 26.758$	0.65	3.27
		$9.689\ln W_{ext} + 0.051Lead_{ext} - 0.404Trail_{ext} - 16.667$	0.44	3.98
		$13.829\ln W_{ext} - 0.173Lead_{mod} - 0.318Trail_{mod} - 22.575$	0.66	3.22

的湿度,就会吸收部分入射能量,导致能量衰减<sup>[23]</sup>,影响对地面的精确探测,对地面探测的不确定性就会影响树高的估测。因此土壤湿度对 ICESat-GLAS 脉冲吸收的影响还需要进一步量化。

### 3 结论与讨论

将坡地上 5 个最大树高估测模型的结果进行对比分析:前 3 个模型分别是基于不同 DEM 数据(自定义 DEM、ASTER GDEM 和 SRTM DEM)的地形指数的 Y. Q. Xing<sup>[12]</sup>模型,后 2 个模型分别是未改进边缘长度线性模型和改进边缘长度的线性模型。通过分析比较发现:1)前 3 个基于 DEM 数据

的模型<sup>[12]</sup>中,SRTM DEM 数据中提取的地形指数所构造的最大树高估测模型精度最高,说明 SRTM DEM 数据提取的地形指数量化地形坡度的能力要优于 ASTER GDEM 和 SRTM DEM 的;2)波形参数的线性模型的精度要高于使用 DEM 数据的地形指数的 Y. Q. Xing<sup>[12]</sup>模型,说明波形参数量化地形坡度的能力要优于 DEM 数据的;3)对于 2 种波形参数线性模型的结果,改进边缘长度线性模型的精度更高,说明改进边缘长度能够更好地量化地形坡度。综上分析结果可知,相对于 DEM 数据的地形指数和未改进边缘长度,改进边缘长度量化地形坡度的能力最强,该参数构造的模型更适合反演坡地

表 3 模型验证结果

Table 3 Model validation results

累积坡度组	样本数	估测模型	P/%
0°~5°	18	$14.149(\ln W_{ext} + 0.014g_1) - 27.244$	92
		$16.530(\ln W_{ext} - 0.020g_2) - 30.028$	92
		$15.006(\ln W_{ext} + 0.0005g_3) - 28.801$	91
		$11.237\ln W_{ext} + 0.448Lead_{ext} - 0.423Trail_{ext} - 22.048$	94
		$12.058\ln W_{ext} + 0.113Lead_{ext} - 0.890Trail_{ext} - 22.792$	78
		$16.208\ln W_{ext} + 0.129Lead_{mod} - 0.610Trail_{mod} - 30.402$	96
0°~10°	32	$14.086(\ln W_{ext} + 0.003g_1) - 26.286$	90
		$14.125(\ln W_{ext} + 0.002g_2) - 26.431$	90
		$14.508(\ln W_{ext} - 0.0008g_3) - 26.903$	89
		$17.994\ln W_{ext} - 0.122Lead_{ext} - 0.556Trail_{ext} - 34.093$	92
		$12.957\ln W_{ext} - 0.056Lead_{ext} - 0.579Trail_{ext} - 24.443$	77
		$16.482\ln W_{ext} - 0.036Lead_{mod} - 0.603Trail_{mod} - 29.963$	92
0°~15°	44	$12.672(\ln W_{ext} + 0.003g_1) - 21.947$	86
		$12.957(\ln W_{ext} - 0.0006g_2) - 22.447$	85
		$13.671(\ln W_{ext} - 0.003g_3) - 23.336$	86
		$15.753\ln W_{ext} - 0.063Lead_{ext} - 0.422Trail_{ext} - 28.546$	90
		$9.929\ln W_{ext} + 0.086Lead_{ext} - 0.434Trail_{ext} - 17.474$	68
		$15.176\ln W_{ext} - 0.188Lead_{mod} - 0.359Trail_{mod} - 25.947$	90
0°~20°	56	$11.535(\ln W_{ext} - 0.001g_1) - 18.676$	80
		$12.260(\ln W_{ext} - 0.005g_2) - 20.072$	81
		$12.950(\ln W_{ext} - 0.005g_3) - 20.651$	81
		$15.332\ln W_{ext} - 0.048Lead_{ext} - 0.506Trail_{ext} - 27.442$	85
		$10.623\ln W_{ext} + 0.031Lead_{ext} - 0.475Trail_{ext} - 18.845$	59
		$13.900\ln W_{ext} - 0.149Lead_{mod} - 0.327Trail_{mod} - 23.006$	87
0°~25°	63	$11.367(\ln W_{ext} - 0.001g_1) - 18.017$	75
		$11.790(\ln W_{ext} - 0.003g_2) - 18.844$	75
		$12.625(\ln W_{ext} - 0.004g_3) - 19.845$	76
		$15.261\ln W_{ext} - 0.082Lead_{ext} - 0.505Trail_{ext} - 26.758$	82
		$9.689\ln W_{ext} + 0.051Lead_{ext} - 0.404Trail_{ext} - 16.667$	50
		$13.829\ln W_{ext} - 0.173Lead_{mod} - 0.318Trail_{mod} - 22.575$	84

的最大树高。另外本研究通过比较基于 M. A. Lefsky<sup>[13]</sup>等所提的未改进的边缘长度的最大树高和平均树高估测结果,发现该波形参数在坡地最大树高估测方面有很大的应用潜力。

由于星载 LiDAR 的激光光斑尺寸较大,波形就很容易受到地形因素的影响,因此地形在估测树高时是必须考虑的一个重要因素,它对估测结果会产生很大的影响,本研究从地形指数和波形参数构造的线性模型方面出发来减弱地形坡度对树高估测的影响。除此之外,建议从以下两方面再进行深入研究:从星载 LiDAR 机理出发,通过物理建模来消除地形坡度的影响,以提高模型的推广应用能力;从

能量出发,考虑发射脉冲和接受脉冲之间的能量衰减对树高估测的影响。

参考文献:

[1] 李德仁,王长委,胡月明,等. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2012,37(6):631-635.  
LI D R, WANG C W, HU Y M, *et al.* General review on remote sensing-based biomass estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(6): 631-635. (in Chinese)

[2] PARK T, LEE W K, LEE J Y, *et al.* Maximum canopy height estimation using ICESat GLAS laser altimetry [J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2012, 28(3): 307-318.

[3] 尤号田,邢艳秋,王铮,等. 利用 LiDAR 离散点云估测针叶林叶面积指数[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):41-47.  
YOU H T,XING Y Q,WANG Z,*et al.* Estimation of the leaf area index of coniferous forests using LiDAR discrete point cloud[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):41-47. (in Chinese)

[4] 邢艳秋,姚松涛,尤号田,等. 基于机载 LiDAR 全波形数据白桦林林分 LAR 反演研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(1):11-18.  
XING Y Q,YAO S T,YOU H T,*et al.* A inversion on birch forest LAI based on airborne LiDAR full waveform data[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(1):11-18. (in Chinese)

[5] FATOYINBO T E,SIMARD M. Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat-GLAS and SRTM[J]. International Journal of Remote Sensing,2013,34(2):668-681.

[6] 夏明鹏,官凤英,范少辉,等. TLS 技术在森林资源调查中的应用现状与展望[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):238-244.  
XIA M P,GUAN F Y,FAN S H,*et al.* Application status and prospect of TLS in forest resources inventory[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(3):238-244. (in Chinese)

[7] WULDER M A,WHITE J C,NELSON R F,*et al.* Lidar sampling for large-area forest characterization: a review[J]. Remote Sensing of Environment,2012,121:196-209.

[8] 赵丽琼,张晓丽,孙红梅. 激光雷达数据在森林参数获取中的应用[J]. 世界林业研究,2010,23(2):61-64.  
ZHAO L Q,ZHANG X L,SUN H M. Application of lidar data to forest parameters estimation[J]. World Forestry Research,2010,23(2):61-64. (in Chinese)

[9] 邢艳秋,姚松涛,李梦颖,等. 基于机载全波形 LiDAR 数据的森林地上生物量估测算法研究[J]. 森林工程,2017,33(4):21-26.  
XING Y Q,YAO S T,LI M Y,*et al.* Estimation algorithm of forest aboveground biomass based on airborne full-waveform LiDAR data[J]. Forest Engineering,2017,33(4):21-26. (in Chinese)

[10] 庞勇,李增元,SUN G Q,等. 地形对大光斑激光雷达森林回波影响研究[J]. 林业科学研究,2007,20(4):464-468.  
PANG Y,LI Z Y,SUN G Q,*et al.* Effects of terrain on the large footprint lidar waveform of forests[J]. Forest Research,2007,20(4):464-468. (in Chinese)

[11] LEFSKY M A,HARDING D J,KELLER M,*et al.* Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat[J]. Geophysical Research Letters,2005,32:1-4.

[12] XING Y Q,DE GIER A,ZHANG J J,*et al.* An improved method for estimating forest canopy height using ICESat-GLAS full waveform data over sloping terrain:a case study in Changbai mountains,China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2010,12(5):385-392.

[13] LEFSKY M A,KELLER M,PANG Y,*et al.* Revised method for forest canopy height estimation from geoscience laser altimeter system waveforms[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2007,1:1-18.

[14] PANG Y,LEFSKY M,ANDERSEN H E,*et al.* Validation of the ICESat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2008,34(S2):S471-S484.

[15] HILBERT C,SCHMULLIUS C. Influence of surface topography on ICESat-GLAS forest height estimation and waveform shape[J]. Remote Sensing,2012,4(8):2210-2235.

[16] 王蕊,邢艳秋,邱赛等. 基于 ICESat-GLAS 全波形数据的坡地森林冠层高度估测[J]. 安徽农业科学,2014,42(9):2790-2793.

[17] SCHUTZ B E,ZWALLY H J,SHUMAN C A,*et al.* Overview of the ICESat mission[J]. Geophysical Research Letters,2005,32(21):L21S01.

[18] 邢艳秋,王立海. 基于 ICESat-GLAS 完整波形的坡地森林冠层高度反演研究-以吉林长白山林区为例[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(6):696-700.  
XING Y Q,WANG L H. ICESat-GLAS full waveform-based study on forest canopy height retrieval in sloped area-a case study of forests in Changbai Mountains,Jilin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2009,34(6):696-700. (in Chinese)

[19] CARABAJAL C C,HARDING D J. ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models[J]. Geophysical Research Letters,2005,32:L22S01.

[20] SUN G,RANSON K J,KIMES D S,*et al.* Forest vertical structure from GLAS: an evaluation using LVIS and SRTM data[J]. Remote Sensing of Environment,2008,112(1):107-117.

[21] BRENNER A C,ZWALLY H J,BENTLEY C R,*et al.* Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights[J]. Geoscience Laser Altimeter System Algorithm Theoretical Basis Document, Version,2003:4.

[22] MALLET C,BRETAR F. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2009,64(1):1-16.

[23] KIMES D S,RANSON K J,SUN G,*et al.* Predicting lidar measured forest vertical structure from multi-angle spectral data[J]. Remote Sensing of Environment,2006,100(4):503-511.