



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 面向茂密植被山区地质灾害调查的 LiDAR 点云密度优化研究
作者: 吴福, 廖泽源, 何娜, 刘昶, 吴秋菊, 磨英飞, 潘兴鱼, 江耀静, 李春玲, 黄鑫, 王宇翔, 董秀军
DOI: 10.13203/j.whugis20230386
收稿日期: 2023-10-10
网络首发日期: 2023-12-22
引用格式: 吴福, 廖泽源, 何娜, 刘昶, 吴秋菊, 磨英飞, 潘兴鱼, 江耀静, 李春玲, 黄鑫, 王宇翔, 董秀军. 面向茂密植被山区地质灾害调查的 LiDAR 点云密度优化研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230386>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230386

引用格式：吴福，廖泽源，何娜，等. 面向茂密植被山区地质灾害调查的机载激光雷达点云密度优化研究[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2023, DOI:10.13203/J.whugis20230386

WU Fu, LIAO Zeyuan, HE Na, et al. Airborne LiDAR for Geological Hazard Investigation in Mountainous Areas with Dense Vegetation on Point Cloud Density Optimization[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, DOI:10.13203/J.whugis20230386

面向茂密植被山区地质灾害调查的 LiDAR 点云密度优化研究

吴福¹ 廖泽源² 何娜¹ 刘昶¹ 吴秋菊¹ 磨英飞¹ 潘兴鱼¹江耀静¹ 李春玲¹ 黄鑫¹ 王宇翔¹ 董秀军²¹ 广西壮族自治区地质环境监测站, 广西南宁, 530000² 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都, 610059

摘要：无人机机载激光雷达技术因受环境影响较小、调查视场角独特、能“穿透”植被等优点在茂密植被山区的地质灾害调查中被广泛认为是一种新型有效的调查手段。然而，现有规范中几乎没有针对地质灾害的点云密度采集标准，仅达到测绘要求的点云密度难以满足展示陡坎、冲沟等微地貌特征的高精度数字高程模型制作。为此，结合广西地质灾害规模较小且植被覆盖茂密的特点，研究了4种较大比例尺下不同点云密度构成的DEM质量变化，提出研究区局部地形复杂度作为定量化评价指标，推导出最佳地面点密度值，再利用研究区不同植被郁闭度下的激光穿透率计算采集点云密度推荐值。结果表明，局部地形复杂度能够有效评价DEM的微地貌保留完整度，实验获得最优采集点云密度值结合大量实践经验，建立了适用于广西茂密植被山区机载LiDAR地质灾害调查的采集点密度参考标准。

关键词：机载激光雷达；采集点密度；点云抽稀；数字高程模型；局部地形复杂度

中图分类号：P237

文献标志码：A

Airborne LiDAR for Geological Hazard Investigation in Mountainous

Areas with Dense Vegetation on Point Cloud Density Optimization

WU Fu¹ LIAO Zeyuan² HE Na¹ LIU Chang¹ WU Qiuju¹ MO Yingfei¹ PAN Xingyu¹JIANG Yaojing¹ LI Chunling¹ HUANG Xin¹ WANG Yuxiang¹ DONG Xiujun²¹ Geological Environment Monitoring Station in Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530000, China² State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Objectives: The drone airborne laser radar technology is widely regarded as a new and effective means of geological disaster investigation in mountainous areas with dense vegetation because it is less affected by the environments, has a unique survey field of view and can “penetrate” vegetation. However, in the existing specifications, there is almost no point cloud density collection standard for geological disasters, and the point cloud density that only meets the mapping requirements is difficult to meet the high-precision digital elevation model production of micro-geomorphic features such as steep ridges and gullies. **Methods:** To this end, in combination with the characteristics of small scale geological hazards and dense vegetation coverage in Guangxi, this paper studies the DEM quality changes composed of different points cloud density

收稿日期：2023-10-10

项目基金：国家自然科学基金（42072306）。

第一作者：吴福，正高级工程师，主要从事地质灾害监测预警、地质灾害防治工作。404630357@qq.com

通讯作者：廖泽源，硕士。liaozeyuana@163.com

under four large scales, proposes the local terrain complexity of the study area as a quantitative evaluation index, and deduces the optimal ground point density value, Then calculate the recommended value of cloud density by using the laser penetration of different vegetation canopy in the study area. **Results and conclusions:** The results show that the local terrain complexity can effectively evaluate the micro-geomorphic retention integrity of DEM. Combined with a lot of practical experience, the optimal cloud density value of collection point is obtained by experiment, which established the reference standard of collection point density for airborne LiDAR geological disaster investigation in mountainous areas with dense vegetation in Guangxi. **Keywords:** airborne LiDAR; density of collection points; point cloud dilution; digital elevation models; local terrain complexity

广西壮族自治区地形地貌多变、地质构造复杂,具有多山地丘陵、少平原,岩溶峰林广布,地表植被覆盖率高等特点,加之受亚热带季风气候影响,降雨丰沛且季节性分配不均,地质灾害频发。广西壮族自治区地质灾害风险普查结果表明,截至 2022 年共发育地质灾害 20062 处,其中崩塌约占 69%,滑坡约占 30%,泥石流约占 1%。^[1-2]传统人工地质灾害调查方法应用在大范围的茂密山区效率较低,难以查明植被覆盖下的灾害形态和变形迹象,机载 LiDAR 技术作为一种高精度、高效率、可“穿透”植被的新型遥测手段在全国地质灾害识别、调查工作中广泛应用,尤其面向华南、西南茂密植被山区,该技术被证实能大大提升地质灾害隐患的早期识别能力^[3-5]。

点云作为 LiDAR 扫描后获得的原始数据集,其密度直接影响后续数字高程模型(digital elevation model, DEM)的精度与分辨率,一般来说,点云密度越高相应地可以获得更高质量的 DEM^[6]。但在现场数据采集过程中,操作人员难以评估不同的植被覆盖程度下,多少采集点密度能够满足构建用于地质灾害识别的数字高程模型的精度需要。一方面,现有的不同比例尺下构建 DEM 的采集点云密度要求是基于地形测绘行业编制的,但地质灾害调查获取机载 LiDAR 数据的目的是解译地质灾害、提取灾害信息,相比地形测绘更关注对微地貌保留完整度,这使得地形测绘的采集点云密度规范并不完全适用于地质灾害识别工作^[7-8],地质灾害频发的四川省率先在地质灾害机载激光雷达数据获取技术规范(DB51/T 2695-2020)中提出了适用于本地的点云密度推荐值,但具有很强的地域性,并不适用于全国。另一方面,原始点云经滤波分类生成地面点时,同一采集设备在地形

复杂程度不同、植被郁闭度不同等条件下生成的地面点云会存在一定差距,进而可能造成 DEM 质量参差不齐,因此无法现场明确“穿透”植被到达地面的点云数量是否满足构建 DEM 的精度需要,极易造成地面点分布不均匀,过低的点云导致无法完整地保留地表裂缝、微地貌形态、环境变化等用于识别地质灾害的前期重要变形征兆,过高的点密度则会导致人力、物力成本的浪费及后期室内数据储存和处理工作量的增加。

查阅国内外关于机载 LiDAR 采集点云密度的相关文献,Anderson^[9]等根据不同点云密度制作了不同分辨率的 DEM 产品,并将其与原始数据制作的相同分辨率的 DEM 产品进行比较。结果表明,点云数据在进行一定程度抽稀后仍可以保留高程精度,但该研究尚未得到确切的最优抽点云抽稀率;Liu^[10]等进一步探究 LiDAR 点云密度对 DEM 产品精度影响发现对原始点云数据进行 50%数据简化后,仍能保持一定的数据精度。然而这些研究中评价不同点云密度构成的 DEM 质量都是采用以测绘为目的的高程中误差作为评级标准,但满足高程误差并不一定能满足精细地貌保留要求,还需提出更适用于地质灾害识别的评价 DEM 精细地貌保留程度的指标。

后续少数研究者进一步探究点云密度与 DEM 空间分辨率的关系^[11-12],如 Zhou Lin^[11]等对不同分辨率的 DEM 数据和高精度 LiDAR 数据进行对比分析,结果表明地貌学研究的最佳空间分辨率是 0.5 m,低于该分辨率会错漏地貌特征,而优于该分辨率并未带来明显变化。但在地质灾害调查中,显然规模不同的地质灾害特征微地貌大小也不同,所需要的最佳空间分辨率便会有所区别,因此,应先依据灾害规模确定

调查比例尺，再在相应比例尺下进行点云密度与 DEM 质量的关系研究。

针对以上问题，为给广西茂密植被山区开展机载激光 LiDAR 地质灾害调查和信息提取工作提供采集点云密度参考值，本研究以广西壮族自治区桂林市阳朔县高田镇古登村委栗木山村滑坡为研究区，运用无人机载 LiDAR 获取的高密度原始点云和正射影像（digital orthophoto model, DOM）作为数据源，对研究区进行植被郁闭度反演，获得高、中、低郁闭度的点云穿透率，再以高程均方根误差（root mean square error, RMSE）和局部地形复杂度值作为 DEM 质量评价指标得到最优地面点密度，最终得到不同比例尺下林分郁闭度对应的最优采集点云密度^[13-18]。

1 研究区概况

广西壮族自治区桂林市阳朔县高田镇古登村委栗木山村研究区位于广西东北部，地理坐标为 110°23'59"E，24°40'56"N，处在广西较为典型的构造剥蚀低山地貌区，地表植被为广西常见的灌木，覆盖率达 70% 以上。研究对象为一土质滑坡，整体形态呈舌型，坡体上下陡中间缓，坡度分布在 0°~87.63° 之间，平均坡度约为 30°，高程分布在 171~472 m 之间，高差达 301 m，整体滑坡范围长约 750 m，宽约 400 m，面积约 0.3 km²（见图 1）。于 2020 年 6 月 8 日暴雨条件下发生过滑动，后续仍有持续蠕滑变形，可观察到明显的滑坡后缘、周界及前缘堆积等微地形特征，地形多变，区内地质信息十分丰富。



图 1 研究区位置图

Fig.1 Study area location map

2 数据与方法

2.1 数据获取及处理

研究区内机载 LiDAR 数据采集利用 D20 型六翼无人升人机搭载 DV-LiDAR10 激光雷达系统，该系统集成了激光雷达和全画幅高清光学相机，在飞行获取机载 LiDAR 点云数据的同时采集光学影像，共飞行 2 个架次，航飞总范围约 2 km²。详细的设备参数和航飞参数设计如表 1 所示。

获取的原始点云后，利用 TerraSolid 软件形成宏命令对点云去噪、滤波、分类后，得到研究区植被层点云数据和真实地面点云数据，后将分类得到的点云及进行人工修整，剔除未剔除干净的其他点、找回分类错误的点，进行数据结果检查后，最终得到研究区用以构建 DEM 的地面点云。将地面点在 ArcGIS10.5 中生成的 DEM，同时用 Pix4dmapper 对光学进行处理生成 DOM。详细数据信息如表 2 所示。

表 1 机载 LiDAR 作业参数表

LiDAR 设备	航飞指标	参数
激光雷达	测距/m	1430 ($p < 80\%$)
	测距精度/mm	±10
	回波次数/次	7
	回波强度/bits	8
	波长/nm	1550
	水平场视角/(°)	100
	垂直场视角/(°)	20
POS	水平定位精度/m	0.01
	高程定位精度/m	0.02
	航向角精度/(°)	0.017
光学相机	有效像素/W	4 200
	焦距/mm	18
航飞指标	航高/m	250
	旁向重叠度/%	35
	飞行速度/($m \cdot s^{-1}$)	10
	激光脉冲/Hz	200

原始机载 LiDAR 扫描点云数据处理及获得可视化产品流程如图 2 所示。

表 2 数据概况表

Tab.2 Data Overview Table

点云数据			DEM			DOM		
原始点云密度/(pts·m ⁻²)	地面点云密度/(pts·m ⁻²)	穿透率/%	比例尺	分辨率/m	坐标系	比例尺	分辨率/m	坐标系
144.84	16.08	11.05	1: 200	0.2	CGCS2000	1: 200	0.05	CGCS2000

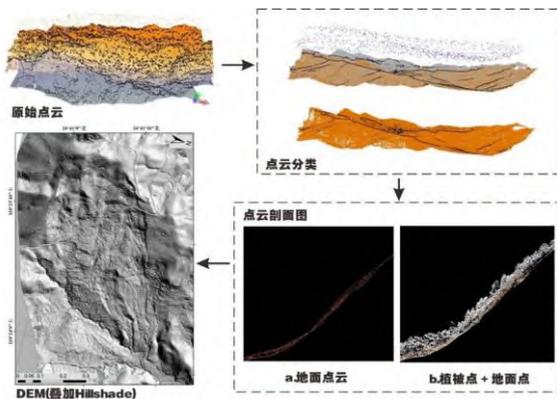


图 2 点云处理及可视化产品生成流程图

Fig.2 Point cloud processing and visual product generation flow

2.2 研究方法

本文将最优采集点密度试验分为 3 步, 首先将地面点云进行不同程度抽稀, 按照 4 种比例尺对应的构网间距构建 DEM 模型; 第二步选取体现地质灾害特征的地形因子构建局部地形复杂度来定量评价 DEM 的微地貌保留程度, 确定最优地面点密度; 最后结合研究区不同植被郁闭度下的激光穿透率推算出现场最优采集点密度。

2.2.1 点云抽稀

本文为尽量模拟真实情况下采集的不同采集点云密度, 对比目前常用的点云抽稀方法如随机抽稀、等间距抽稀和基于曲率抽稀等后, 采用随机抽稀法将地面点云进行抽稀^[19]。点云保留率设置为 80%、60%、40%、20%、10%、5%、1%共 7 个梯度, 以未抽稀的原地面点云作为参照, 对比分析采样密度对 DEM 质量的影响。抽样后密度满足《机载激光雷达数据获取技术规范》(CHT 8024-2011)中不同比例尺下构建 DEM 的要求, 以保证保留有最基本的地形信息。研究区内未抽稀地面云密度达到 16.08 pts/m², 远远优于其他相关研究的最高密度, 最低点云密度为 1.15 pts/m², 点云密度区间跨度足够大, 以保证最优点密度落在试验区区内。该试验点云数

据详情如表 3 所示。

表 3 试验点云数据基本信息表

Tab.3 Basic information table of test point cloud data

点云保留率/%	点云数量	最小点云密度/(pts/m ²)	最大点云密度/(pts/m ²)	点云密度/(pts/m ²)
100	16 442 012	1	206	16.08
80	13 153 609	1	167	13.08
60	9 865 207	1	126	10.08
40	6 576 805	1	89	7.08
20	3 288 403	1	50	4.07
10	1 644 201	1	25	2.54
5	822 100	1	14	1.77
1	164 420	1	7	1.15

本研究是针对广西境内开展地质灾害的详细调查工作而开展, 全域内多为中小型灾害, 精细化调查一般采用 1:500、1:1 000 或 1:2 000 比例尺, 考虑到局部调查对准确性的更高要求, 本文还考虑了 1: 200 比例尺下构建高精度 DEM 所需的点密度。因此, 将研究区内 8 组点云密度按照 1: 200 比例尺的 0.2 网格间距、1: 500 比例尺的 0.5 m 网格间距、1: 100 比例尺的 1.0 m 网格间距和 1: 2 000 比例尺的 2.0 m 网格间距内插生成 DEM。以未抽稀地面点云构建的高分辨率 DEM 作为参照组评定其他 DEM 质量, 首先进行人工目视对比地质灾害解译效果。

2.2.2 DEM 评价指标及地面点密度确定

仅仅依靠目视解译灾害特征和提取信息具有很强的主观性和结果的不唯一性, 为量化评价各点密度构建的 DEM, 先选取常用的 RMSE 作为高程质量评价指标^[20-21]。该值越小说明 DEM 越贴近真实地形。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式中, Z_i 为 DEM 中采样点的高程值; \hat{Z}_i 为实际采样点的高程值; n 为采样点个数。

但 RMSE 是从高程角度评定, 仅仅是高程误差小并不能说明保留了能够识别地质灾害的

特征微地貌。于是，本文选取能高度反映变形特征的单一地形因子，构建地形复杂度模型，量化反应 DEM 对微地貌的保留度。众多学者对构建地形复杂度的地形因子选取各有不同，总结目前常用的地形因子包括坡度、地表粗糙度、地形起伏度、全曲率、局部标准差、地形位置指数和地形信息熵等，用单一的地形因子来量化地形复杂度往往只是反映了某一方面的地形复杂程度，表达并不全面，引入多个因子表达地形复杂度更为科学可靠。本文基于方便量化、与地灾识别强相关的原则初选坡度变率（slope of slope, SOS）、地表粗糙度（Terrain Ruggedness, TR）、地形起伏度（relief degree of land surface, RDLS）、地形位置指数（terrain position index, TPI）4 个因子^[22]。

坡度变率 SOS 是地面坡度在局部区域的变化率。本质是地面高程的变化率，从这个角度它等同于高程变化的二次导数剖面曲率（ K_v ），计算式如下：

$$SOS = K_v = -(rp^2 + 2spq + tq^2)/(p^2 + q^2)(p^2 + q^2 + 1)^{3/2} \quad (2)$$

式中， $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ 是x方向高程变化率； $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ 是y方向高程变化率； $s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ 是x方向高程变化率在y方向的变化率； $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ 是y方向高程变化率的变化率； $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ 是x方向高程变化率的变化率；z 为 DEM 中某点高差。

地表粗糙度 TR 是指真实地表面与理想地表面（如大地水准面）在垂直方向上的偏离程度，用于刻画单位地表单元中地表起伏的复杂程度，该值越大，表面越粗糙，计算式如下：

$$TR = \frac{S_s}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{si}}{\sum_{i=1}^n S_{si} \cos \alpha_i} \quad (3)$$

式中， S_s 为实际面积； S 为投影面积； $\cos \alpha$ 为由坡度值计算得到； n 为参与计算的三角面个数。

地形起伏度 RDLS 是局部区域的高差，表征地势起伏特征，该值越大说明局部地形复杂度越高，计算式如下：

$$RDLS = H_{\max} - H_{\min} \quad (4)$$

式中， H_{\max} 为某一局部区域最大高程值； H_{\min} 为某一局部区域最小高程值。

地面上某点的 TPI 值为某一点高程值与该点邻域内（自定义某一区域）其他点的高程平均值之差。TPI 值能体现相对地形位置关系，该值的绝对值越大证明局部区域地形变化更剧烈，TPI 计算式如下：

$$TPI = H_0 - \frac{1}{n_r} \sum_{i \in r} H_i \quad (5)$$

式中， H_0 为中心点高程； H_i 为某一局部内高程值； r 为局部邻域半径； n 为邻域内高程点数量。

以上初步选定的地形因子还需进行相关性分析，相关性过大会导致不同因子携带的信息重叠度较多，便失去了研究多个因子的意义^[23]，本文在 SPSS 软件中使用了 Pearson 积差相关系数进行分析，再对相关系数进行显著性验证。4 个因子的皮尔逊相关性和显著性结果见表 4。

表 4 地形因子相关性矩阵

Tab.4 Terrain factor correlation matrix

Pearson 相关系数	TPI	SOS	TR	RDLS
TPI	1	0.018	-0.062	-0.072
显著性 p		0.461	0.012	0.003
SOS	0.018	1	0.111	0.143
显著性 p	0.461		<0.001	<0.001
TR	-	0.111	1	0.969
显著性 p	0.012	<0.001		<0.001
RDLS	-	0.143	0.969	1
显著性 p	0.072	<0.001	<0.001	

从地形因子相关性表格可知，显著性 p 值代表因子间是否显著相关， $p < 0.05$ 说明有显著相关性，则说明 TPI 和 TR、RDLS 显著相关。相关性系数 R 值可以体现因子为正、负相关性， $|R| > 0.3$ 说明两因子有中或强相关性。综合考虑 TPI、SOS 两地形因子之间相关性较低，可作为构建局部地形复杂度模型的核心因子。

为将多个因子综合考虑，本文采用 CRITIC 法为各因子赋权，构建研究区局部地形复杂度模型，该定权方法是以评价指标的变异性和冲突性作为标准进行计算的，变异性使用标准差进行衡量，标准差越大，则权重越大，而冲突性是以指标间的相关系数进行确定，相关性越强则冲突性弱、权重小。再将变异性和冲突性相

乘后归一化便得到了归一化后的权重系数。因归一后的权重系数的计算数据是无量纲化后的地形因子, 为便于直接带入地形因子计算地形复杂度, 现将权重系数进行反无量纲化, 各地形因子的真实权重系数为:

$$\omega_i = \frac{\omega_i'}{\bar{x}_i} \quad (6)$$

式中, ω_i 为第 i 个地形因子的真实权重系数; ω_i' 为第 i 个地形因子的归一化权重系数; \bar{x}_i 为第 i 个地形因子的样本均值。

最后采用求和的方式来综合各地形因子, 最终得到地形复杂度模型为:

$$T_{C_i} = \sum_{i=1}^2 T_{C_{i_i}} \quad (7)$$

式中, T_{C_i} 为局部地形复杂度因子; $T_{C_{i_i}}$ 为第 i 个地形因子的综合权重后的值。

求得各比例尺下不同点云密度构建的 DEM 的高程 RMSE 和局部地形复杂度, 寻找以某点为中心固定邻域长度的离散差最大值, 该点即为曲线转折点。超过地形复杂度转折点即增大点云密度对地形地貌的保留能力提升开始减缓, 则以该点作为最优地面点密度。

2.2.3 采集点云密度确定

原始采集点云由最优地面点取值范围和激光穿透率计算得到, 公式如下:

$$\text{采集点密度} = \frac{\text{地面点密度}}{\text{激光穿透率}} \quad (8)$$

激光穿透率很大程度受植被覆盖程度的影响, 郁闭度 (canopy density of vegetation) 是指树冠在阳光直射下在地面的总投影面积 (冠幅) 与此林地 (林分) 总面积的比, 可用于量化反映植被覆盖^[10]。根据现场对研究区植被郁闭度的初步估测, 再结合林分调查中郁闭度等级划分, 将研究区郁闭度为低、中、高三个等级, 对应树冠的闭合程度如下: 郁闭度分级为低度, 树冠闭合程度为 (0, 0.2); 郁闭度分级为中度, 树冠闭合程度为 [0.2, 0.69]; 郁闭度分级为高度, 树冠闭合程度为 [0.7, 1]。统计不同郁闭度等级中的植被点与地面点, 得到植被郁闭度与激光穿透率对应关系, 利用上式求得原始采集点云密度值。

3 结果与分析

3.1 不同点云密度 DEM 地形表达能力

对比后缘下错、裂缝、冲沟在不同点云密度生成的 DEM 中的表达情况, 初步分析满足滑坡要素识别的点云密度范围。图 3 为不同点云密度生成 0.2 m 分辨率 DEM 对滑坡地貌特征的保留情况, 对比 16.08 pts/m² 和 1.15 pts/m² 点云的微地貌保留情况, 后者几乎完全丢失下错、裂缝等信息, 随着点云密度上升滑坡要素的展现更加完整, 目视解译初步判断点云密度不宜低于 4.07 pts/m²。同样地, 对 1: 500、1: 1 000 和 1: 2 000 比例尺下的不同点云密度生成的 DEM 表达地形能力进行对比分析。

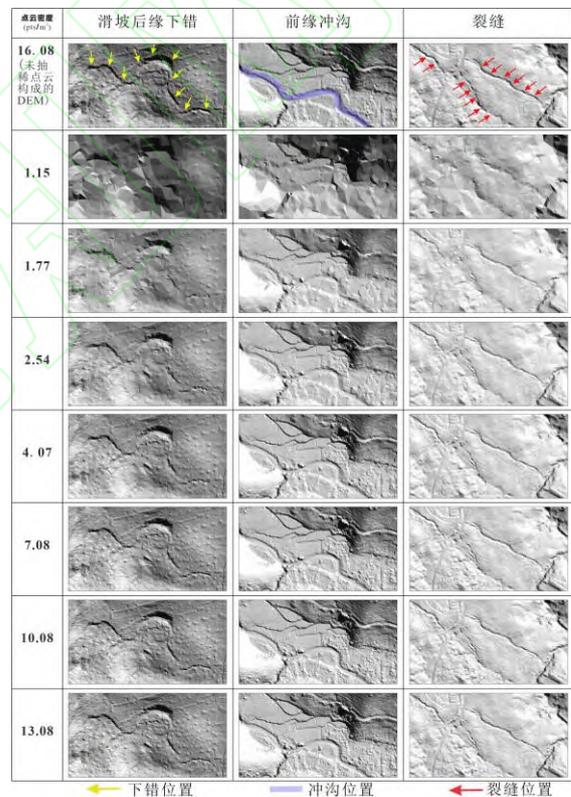


图 3 地貌特征在不同点云密度下的 DEM (叠加山体阴影) 图像

Fig.3 DEM images of geomorphological features at different point cloud densities

3.2 地面采集点密度

对研究区点云抽稀程度不同的 DEM 高程误差进行计算, 如图 4 所示, RMSE 为亚厘米级, 高程 RMSE 误差范围从 0.027 8~0.306 8 m, 都满足测绘标准中对 DEM 的高程中误差要求。随着空间分辨率从 2 m 增加到 0.2 m, 误差逐渐减小。各比例尺下随着点云密度的降低, 高程误

差呈逐渐增大的趋势。

图 4 不同比例尺高程 RMSE/m

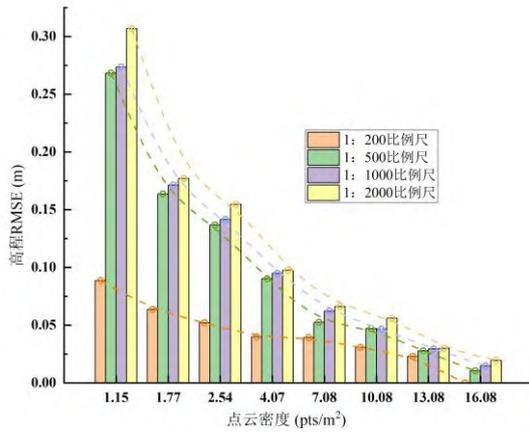
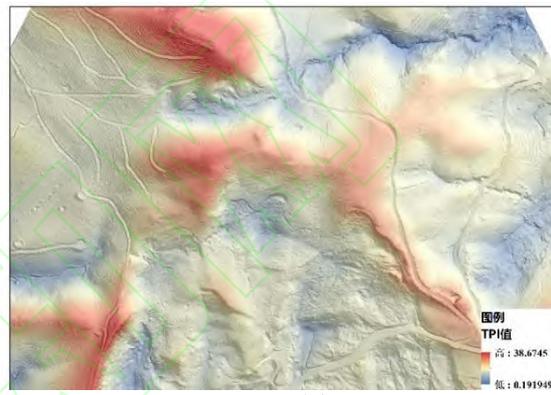
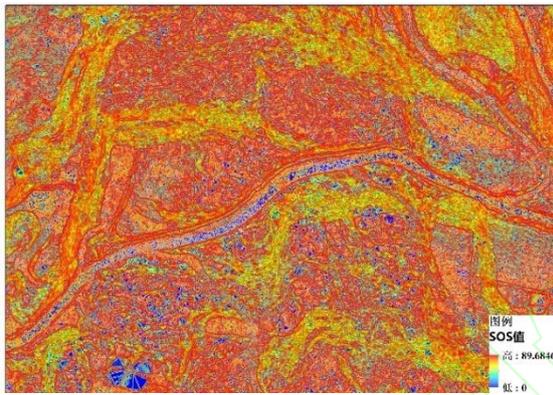


Fig.4 Different scale elevation RMSE/m

运用 ArcGIS 计算 SOS 和 TPI 两地形因子，TPI 值的计算邻域窗口为 3×3 像元，为精简化图分析数据量，同时又要保留数据变化趋势，参照风险评价计算单元划分方式将两地形因子值按照 25 m×25 m 网格重新统计,共计 1 662 个统计单元。0.2 m 构网间距 DEM 生成的两地形因子如图 5 所示。



(a)SOS 图

(b)TPI 图

图 5 研究区局部地形因子

Fig.5 Local topographic factors in the study area

将两地形因子数据正向化后进行 CRITIC 法定权结果如表 5 所示。

表 5 CRITIC 权重计算结果

Tab.5 CRITIC weight calculation results

地形因子 (项)	指标变 异性	指标冲 突性	综合权 重系数	归一化权 重系数
SOS	0.104	1.093	0.114	0.5816
TPI	0.075	1.093	0.082	0.4184

将归一化权重系数进行反无量纲化(TPI 取绝对值的平均值)，输出 SOS 和 TPI 地形因子的真实权重系数为：

$$\omega_{SOS} = \frac{C_{SOS}}{\bar{x}_{SOS}} = \frac{0.5816}{79.5182} = 0.0073 \quad (9)$$

$$\omega_{TPI} = \frac{C_{TPI}}{\bar{x}_{TPI}} = \frac{0.4184}{77.8204} = 0.0054 \quad (10)$$

提出该研究区考虑坡度和高程变化的局部地形复杂度 (local terrain complexity index -slope and elevation, TCI)，指标计算公式为：

$$TCI = 0.0073 \cdot SOS + 0.0054 \cdot TPI \quad (11)$$

1: 200 比例尺下 TCI 分布如图 6 所示。

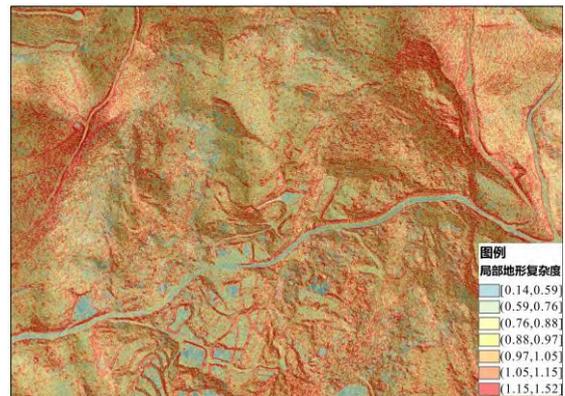


图 6 1: 200 比例尺 TCI 图

Fig.6 1:200 scale TCI diagram

将不同比例尺下各密度点云生成的 DEM 按照式 (11) 进行地形复杂度计算，统计 1662 个计算单元的地形复杂度算术平均值如图 7 所示。

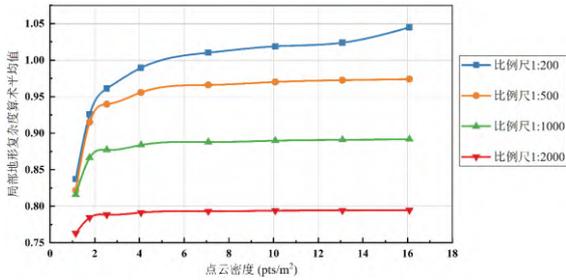


图 7 不同比例尺下局部地形复杂度平均值变化曲线

Fig.7 The average change curve of local terrain complexity under different scales

从整体看, 横向比较不同点云密度, TCI 值随着地面点云密度的升高呈增大的趋势, 但在超过某一阈值后, 点云密度继续增加, TCI 值变化不大。纵向比较不同比例尺, DEM 分辨率越

高对微地貌保留越完整。

综合考虑高程 RMSE 和 TCI 误差, 在固定点云密度为 2 的区间内对曲线进行离散差寻峰, 该最大离散差值点代表点云密度变化对指标的影响速率开始降低。超过 TCI 转折点说明点云密度增加对微地貌保留完整度提升速度开始减缓, 超过高程 RMSE 的转折点则说明点云密度增加对高程精度提升变慢。从经济层面考虑, 该点意味最经济的点云密度值。

如图 8 所示细节图, 1: 200 比例尺下, 满足地质灾害解译要求的最优地面点云密度为 3.9 pts/m^2 。同理可获得, 1: 500 比例尺最优地面点密度为 2.8 pts/m^2 , 1: 1000 比例尺最优地面点密度为 2.7 pts/m^2 , 1: 2000 比例尺最优地面点密度为 2.2 pts/m^2 。

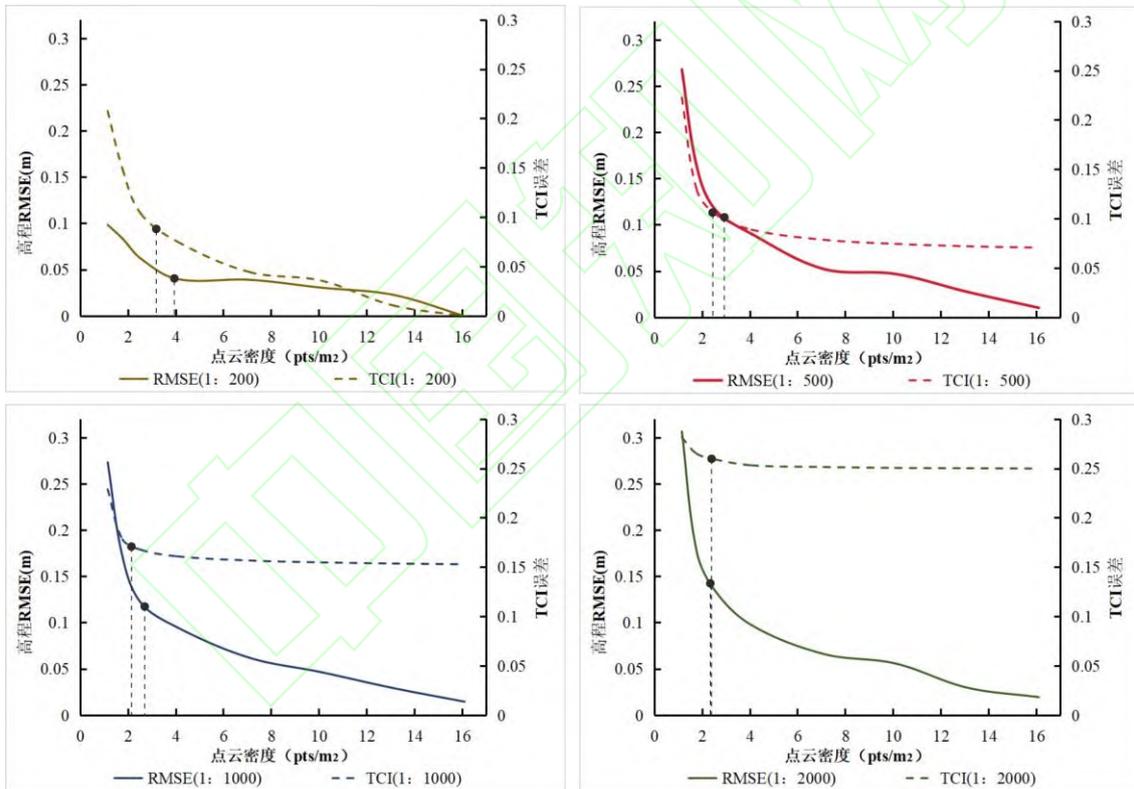


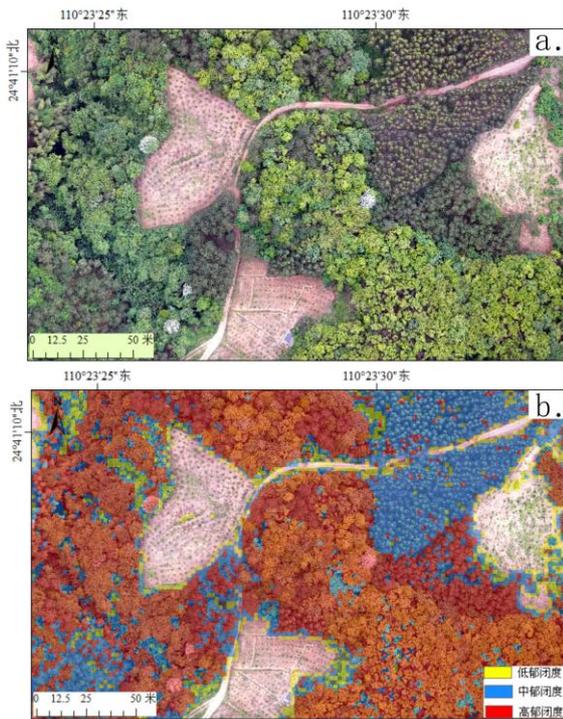
图 8 不同比例尺下高程 RMSE、TCI 最大离散差点

Fig.8 The maximum discrete difference of RMSE and TCI at different scales

3.3 最优采集点云密度

运用 ArcGis 软件将含植被和地面点生成的 DSM 与地面点生成的 DEM 作差, 以 2 m 作为阈值判定是否存在植被覆盖, 将判别结果按照 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 矩形进行分区统计, 后对区域内差值进

行归一化, 最后得到研究区植被郁闭度反演结果见图 9 (b), 与 DOM 展现的真实植被覆盖情况图 9 (a) 对比, 常绿阔叶林基本被识别为高郁闭度, 针叶林识别为中郁闭度, 稀疏的低矮灌木、果树和道路识别为低郁闭度, 整体反演效果良好。



(a) DOM 植被分布 (b) 郁闭度反演结果

图9 郁闭度反演对比

Fig.9 Canopy density inversion comparison

将原始采样点云和地面点云按照郁闭度等级统计，精确获得各郁闭度与激光穿透率的对应关系如表 6 所示。

表 6 不同植被穿透率测试结果

Tab.6 Test results of different vegetation

郁闭度	penetration rates		
	采样点密度 /(pts/m ²)	地面点密度 /(pts/m ²)	穿透率 /%
[0.7, 1]	192.63	11.51	5.98
[0.2, 0.69]	203.82	16.15	7.92
[0, 0.2)	98.32	20.36	15.71

在不考虑其他因素情况下，激光穿透率与林分郁闭度在整体上呈现负相关趋势，即植被郁闭度为单一变量时，植被郁闭度越高，穿透率就越低，地面点密度就越小，因此地面点云密度与激光穿透率存在正比关系。相应地，激光穿透率越低，生成足够精度的 DEM 所需的采样点云密度越高。

用激光穿透率和最优地面点云密度按照式 8 计算采集点密度，1: 200 比例尺下高郁闭度 [0.7,1]的采集点密度最优值计算过程如下：

$$\text{采集点密度} = \frac{3.965.23}{0.0598} \approx 65.3 \quad (12)$$

即推荐采集点密度应大于等于 65.3 pts/m²。其他比例尺下对应各郁闭度下采集点密度计算方法相同。

对比测绘行业标准，综合考虑数据采集成本、地质灾害调查精度需求、调查区植被覆盖情况不同等因素，本文在面向广西茂密植被山区开展机载 LiDAR 地质灾害精细化调查的采样密度点云的推荐值如表 7 所示。

表 7 广西机载 LiDAR 地质灾害精细化调查采样密度点云的推荐值

Tab.7 The recommended value of sampling

调查比例尺	林分郁闭度	测绘行业标准	点云密度 /(点·m ²)	航带接边/m
1: 200	[0.7, 1]	未规定	≥65.3	≤0.02
	[0.2, 0.69]		≥49.3	
	[0, 0.2)		≥24.9	
1: 500	[0.7, 1]	≥16	≥46.9	≤0.05
	[0.2, 0.69]		≥35.4	
	[0, 0.2)		≥17.9	
1: 1000	[0.7, 1]	≥4	≥45.2	≤0.1
	[0.2, 0.69]		≥34.1	
	[0, 0.2)		≥17.2	
1: 2000	[0.7, 1]	≥1	≥36.8	≤0.15
	[0.2, 0.69]		≥27.8	
	[0, 0.2)		≥14.1	

参照表 7 进行现场数据采集时，可采用简单快捷的目测法获取大概的林分郁闭度，然后再使用对应的采集点密度区间。若出现小范围调查区的植被郁闭度变化区间跨度较大，超过了表中的 3 个郁闭度区间，便取较高郁闭度区间对应的采集点密度。实际工作中，还应根据不同需求、不同地形条件进行调整，当地形较为破碎时，需要保留更多地形地貌信息，应适当增加采集点密度。

4 结 语

本文以广西桂林市阳朔栗木山村滑坡机载 LiDAR 点云作为数据源，考虑了不同植被郁闭度对激光穿透率的影响，利用定量评价方法确定了用于地质灾害和地形信息提取的 DEM 最佳地面点密度，进一步提出广西茂密植被山区类似地形下开展机载 LiDAR 地质灾害调查最优的采集点密度范围。主要有以下结论：

1) 采用 CRITIC 法考虑 SOS、TPI 两地形因子构建的研究区局部地形复杂度 (TCI) 指标能够更好地定量评价 DEM 对陡坎、冲沟、裂缝等微地貌的保留完整度。从 TCI 曲线可以发现, 当点云密度增至一定阈值后, 密度增大对微地貌保留能力的提升趋于平稳, 该现象说明, 存在经济性高且满足 DEM 质量要求的点云密度值。

2) 对高程 RSME 和 TCI 误差曲线采用对某点相同区间长度离散差寻峰的方法, 获得了满足地质灾害调查精度需要的 DEM 最佳地面点云范围。该范围确定了机载 LiDAR 在地质灾害调查中的点云密度下限, 可以根据实际项目要求适量增加采集点密度。

3) 综合考虑数据采集成本、地质灾害调查精度需求提出的最优采集点云密度区间能更好地适应茂密植被山区的地质灾害调查工作。对比传统测绘行业标准仅针对高程误差提出的点云密度范围, 本文综合考虑高程误差和微地貌保留误差提出了不同植被郁闭度下的最优的采集点云密度, 对广西地质灾害调查有良好的实际应用意义。

参考文献(References)

- [1] SUN Jiarong,ZHOU Guoping,LIU Fengtao. Analysis of the distribution law and formation conditions of geological disasters in Guangxi.Engineering Technology Research,2021,6(18):244-245. (孙加荣,周国平,刘锋涛.广西地质灾害分布规律及形成条件探析[J].工程技术研究,2021,6(18):244-245.)
- [2] ZHOU Jin, FAN Qiuyan, ZHU Zhen, et al.Study on the Distribution Characteristics and influencing Factors of Geological Disasters in Guangxi.Value Engineering,2023,42(17):148-150. (周金,范秋雁,朱真等.广西地质灾害的分布特征及其影响因素研究[J].价值工程,2023,42(17):148-150.)
- [3] PAN Xing, SHE Jinxing, DONG Xiujun, YANG Wunian. Research on Early Recognition of Landslide Hazards by Airborne LiDAR Technology--A Case Study of Yantian District, Shenzhen[J]. Surveying and Mapping, 2020, 43(06): 243-247. (潘星,余金星,董秀军等.基于机载 LiDAR 遥感技术的滑坡早期识别研究——以深圳盐田区为例[J].测绘,2020,43(6):243-247.)
- [4] Sun Tao, Xu Mingyu, Dong Xiujun, et al. Application of airborne LiDAR technology in geological hazard investigation in mountainous area with dense vegetation.[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2021(4):90-97. (孙涛,徐明宇,董秀军等.机载 LiDAR 技术应用于茂密植被山区地质灾害调查[J].测绘通报,2021(4):90-97.)
- [5] GUO Chen, XU Qiang, DONG Xiujun,et al. Geohazard Recognition by Airborne LiDAR Technology in Complex Mountain Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1538-1547. (郭晨,许强,董秀军等.复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究[J].武汉大学学报 (信息科学版) 2021,46(10):1538-1547.)
- [6] DENG Bo, ZHANG Hui, BAI Jun,et al.Hazard evaluation of the slope in Shenzhen based on airborne LiDAR data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220141.(邓博,张会,柏君,等.利用机载 LiDAR 的深圳斜坡类地质灾害危险性评价[J].武汉大学学报 (信息科学版), 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220141.)
- [7] DONG Xiujun, DENG Bo, YUAN Feiyun, FU Xia, ZHANG Wenju, JU Yuanzhen, REN Xiaohu. Application of Aerial Remote Sensing in Geological Hazards: Current Situation and Prospects[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(12): 1897-1913.(董秀军,邓博,袁飞云,付霞,张文居,巨袁臻,任晓虎.航空遥感在地质灾害领域的应用:现状与展望[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1897-1913.)
- [8] CHEN Tao. Application of airborne lidar technology in quantitative study of tectonic landforms[J].International Seismological Dynamics,2015(6):44-46. (陈涛.机载激光雷达技术在构造地貌量化研究中的应用[J].国际地震动态,2015(6):44-46.)
- [9] Anderson, S E, Tompson, etal. LiDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates[J]. The International Journal of Remote Sensing, 2005,26(18): 3889-3900.
- [10] Liu X,Zhang Z,Peterson J.The Effect of LiDAR Data Density on DEM Accuracy[C].International

- Congress on Modelling and Simulation, Christchurch, New Zealand, 2007.
- [11] Zhou Lin, Heitaro Kaneda, Sakae Mukoyama. Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey [J]. *Geomorphology*, 2013, 182: 104-115.
- [12] WANG Kangkang, ZHENG Xuedong, LAI Xudong. Relationship Between Airborne LiDAR Point Cloud Density and DEM product Accuracy [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(03): 78-82. (王康康, 郑学东, 赖旭东. 机载 LiDAR 点云密度与 DEM 产品精度关系研究 [J]. *测绘地理信息*, 2021, 46(03): 78-82.)
- [13] Jose Balsa-Barreiro and Jose.Lerma. A new methodology to estimate the discrete-return point density on airborne lidar surveys [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35 (4) : 1496-1510.
- [14] Stular B, Lozic E, Eichert A S. Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology [J]. *remote sensing*, 2021(13).
- [15] FFAsal. Evaluation The Effectics of Reductions in LiDAR Data on The Visual and Statistical Characteristics of The Created Digital Elevation Models [J]. *remote sensing and spatial informatin science*, 2016, III-2(91).
- [16] F.AgueraVega, M.AgueraPuntas. Effects of point cloud density, interpolation method and grid size on derived Digital Terrain Model accuracy at microtopography level [J]. *international journal of remote sensing*, 2020, 41: 21.8281-8299.
- [17] Duka A, Tomljanovic K, Franjevic M. Application and Accuracy of Unmanned Aerial Survey Imagery after Salvage Logging in Different Terrain Conditions [J]. *Forests*, 2022, 13: 2054.
- [18] Bojan Rupnik, Domen Mongus, Borut Zalik. Point Density Evaluation of Airborne LiDAR Database [J]. *Journal of Universal Computer Science*, 21 (4) : 587-603.
- [19] Pei Yixuan, Chen Chuanfa, Wang Xin, et al. Effects of Airborne LiDAR Point Cloud Density and Interpolation Methods on the Accuracy of DEM and Surface Roughness. [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2023, 25(2): 265-276. (贝祎轩, 陈传法, 王鑫等. 机载 LiDAR 点云密度和插值方法对 DEM 及地表粗糙度精度影响分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(2): 265-276.)
- [20] Wang Daojie, Chen Bei, Sun Jianhui. Study on the effects of point density on DEM accuracy of airborne LiDAR [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(5): 140-144+169. (王道杰, 陈倍, 孙健辉. 机载 LiDAR 点云密度对 DEM 精度的影响 [J]. *测绘通报*, 2022(5): 140-144+169.)
- [21] YANG Feng, DENG Qingchun. DEM and accuracy evaluation of shallow gully in dry-hot valley based on point cloud thinning [J]. *Journal of China West Normal University (Natural Science)*, 2023, 44(3): 279-289. (杨枫, 邓青春. 基于点云抽稀构建干热河谷浅沟 DEM 及精度评价 [J]. *西华师范大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44(3): 279-289.)
- [22] Tang Yuhan. A thin-method based on local terrain complexity index for LiDAR bare earth surface point cloud [D]. *Southwest Jiaotong University*, 2020. (唐钰涵. 一种基于局部地形复杂度指标的机载 LiDAR 地面点云数据抽稀方法 [D]. 西南交通大学, 2020.)
- [23] ZHANG Qianning. A new simplification method based on terrain complexity for LiDAR Point Cloud [D]. *Southwest Jiaotong University*, 2017. (张倩宁. 基于地形复杂度的 LiDAR 点云简化方法研究 [D]. 西南交通大学, 2017.)