



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: 植被茂密山区机载激光雷达数据采集最优点密度试验研究  
作者: 陈邦松, 司马劲松, 赵光祖, 董秀军, 雷文权, 陈庭轩, 何秋霖  
DOI: 10.13203/j.whugis20240097  
收稿日期: 2024-06-11  
网络首发日期: 2024-07-19  
引用格式: 陈邦松, 司马劲松, 赵光祖, 董秀军, 雷文权, 陈庭轩, 何秋霖. 植被茂密山区机载激光雷达数据采集最优点密度试验研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240097>



**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.whugis20240097

引用格式：

陈邦松, 司马劲松, 赵光祖, 等. 植被茂密山区机载激光雷达数据采集最优点密度试验研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240097 (CHEN Bangsong, SIMA Jingsong, ZHAO Guangzu, et al. Optimal Point Density of Airborne LiDAR Data Collection for Hazards in Mountainous Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240097)

## 植被茂密山区机载激光雷达数据采集最优点密度试验研究

陈邦松<sup>1,2</sup> 司马劲松<sup>3</sup> 赵光祖<sup>1,2</sup> 董秀军<sup>3</sup> 雷文权<sup>3</sup> 陈庭轩<sup>1</sup> 何秋霖<sup>3</sup>

1 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州, 310000

2 浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司, 浙江 杭州, 310030

3 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：**本研究围绕机载激光雷达(LiDAR)技术在植被茂密山区地质灾害调查中的应用展开。机载LiDAR能够穿透植被覆盖,快速、精准地获取大范围地表数据,对于识别和分析地质灾害至关重要。然而,在植被茂密地区,特别是地质灾害遥感调查领域,机载LiDAR点云密度缺乏统一标准。此外,由于操作人员难以评估不同郁闭度条件下的地面点数量,导致数据冗余和成本增加。针对以上问题,本文提出了一种最优采集点密度计算方法。在满足测绘标准的基础上,结合目视解译的效果,使用局部地形复杂度作为评判DEM的标准,继而采用离散差寻峰法确定不同比例尺和郁闭度下的最优采集点密度。为获取植被茂密地区1:200调查比例尺之下适于地质灾害解译工作的DEM,需要不少于147点/m<sup>2</sup>的平均采集点密度;1:500对应的是70点/m<sup>2</sup>;1:1000对应56点/m<sup>2</sup>;1:2000对应47点/m<sup>2</sup>。该研究为茂密植被地区的机载LiDAR点云数据采集工作提供了指导,同时为地质灾害解译和其他相关领域的研究提供了新的思路和方法。

**关键词：**机载激光雷达;点云密度;离散差值寻峰;地质灾害解译

## Optimal Point Density of Airborne LiDAR Data Collection for Hazards in Mountainous Areas

CHEN Bangsong<sup>1,2</sup> SIMA Jingsong<sup>3</sup> ZHAO Guangzu<sup>1,2</sup> DONG Xiujun<sup>3</sup> LEI Wenquan<sup>3</sup> CHEN Tingxuan<sup>1</sup> HE Qiulin<sup>3</sup>

1 PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, 310000, China

2 Zhejiang East China Geotechnical Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, 310030, China

3 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059, China

**Abstract:** Objectives: This research focuses on the application of Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) technology in geological hazard investigation in mountainous areas with dense vegetation. Airborne LiDAR is able to penetrate vegetation cover to acquire a large range of surface data quickly and accurately, which is critical for identifying and analyzing geological hazards. However, on the one hand, in densely vegetated areas, especially in the field of remote sensing survey of geological hazards, airborne LiDAR point cloud density lacks a uniform standard. On the other hand, it is difficult for operators to evaluate the number of ground points under different canopy conditions, resulting in data redundancy and increased costs. Methods: To solve the above problems, this paper presents a method for calculating the optimal collection point density. On the basis of satisfying the surveying standard and combining the effect of visual interpretation, the local terrain complexity is used as the criterion to evaluate DEM, then using the discrete difference peak search method to determine the optimal collection point density under different scale and canopy density. Results: In order to obtain precise DEM for geological hazard interpretation in densely vegetated areas under 1:200 survey scale, an average collection point density of not less than 147 points/m<sup>2</sup> is required; 1:500 corresponds to 70

收稿日期：2024-06-11

基金项目：国家自然科学基金(42072306)。

第一作者：陈邦松, 硕士, 高级工程师, 主要研究机载雷达在地质灾害领域应用及解译。chen\_bs@hdec.com

通讯作者：司马劲松, 硕士生。2768343541@qq.com

points/m<sup>2</sup>; 1:1000 corresponds to 56 points/m<sup>2</sup>; 1:2000 corresponds to 47 points/m<sup>2</sup>. Conclusion: This study provides guidance for airborne LiDAR point cloud data collection in dense vegetation areas, new ideas and methods for geological hazard interpretation and other related fields as well.

**Keywords:** Airborne LiDAR; Point cloud density; Discrete difference peak-seeking method; Interpretation of geological hazards.

许多地质灾害隐藏在植被之下<sup>[1-2]</sup>, 早期识别存在难度, 传统的人工勘查手段在植被茂密地区既难以开展, 又缺少获取整体灾害特征和分布情况的视角<sup>[3-4]</sup>。然而, 机载激光雷达 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 技术的发展, 为植被覆盖地区隐蔽地质灾害调查提供了新的视角。它能够快速、精准地获取大范围的地表数据, 通过其高分辨率的三维扫描能力, 为地表形态提供了详细的视图, 这对于识别和分析地质灾害至关重要<sup>[4]</sup>。此外, 机载 LiDAR 凭借其多次回波的数据采集手段能够穿透植被覆盖, 为植被茂密区域的地质灾害隐患点识别带来了革新性的方法。

机载 LiDAR 的主要产物是点云数据, 这些数据经过处理后可以生成数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。DEM 在地质灾害调查和解译中扮演着核心角色, 无论是传统的人工目视解译还是利用机器学习技术进行自动解译, DEM 都能通过精确的地形模拟, 为灾害调查提供一个详细且可靠的基础<sup>[1]</sup>。

但是目前对于点云数据以及其 DEM 产品的标准存在诸多问题。首先, 机载 LiDAR 点云密度尚无统一标准或参考依据。现有的机载激光雷达数据获取技术规范 (CH/T 8024-2011) 是由我国测绘行业所制定, 它对不同比例尺下点云数据密度做出了规定。然而, 其规定的最高点密度仅限定在大于 16 点/平米, 只能满足测绘领域等高线的识别, 没考虑植被覆盖情况下的地质微地貌要素 (如地裂缝、滑坡边界、错台陡坎、洼地、岩溶漏斗) 的解译需求。此外, 规定涵盖的最大分幅比例尺为 1:500, 在地质灾害调查中不同比例尺所关注的地质微地貌要素有差异, 较小的比例尺用于分辨灾害全貌, 而较大的比例尺 (如 1:200) 用于精确定位滑坡边界和裂缝位置等。其次, 由于目前对地质灾害的解译工作大部分是通过人工目视完成, 评判 DEM 是否满足解译精度要求的指标是主观的, 因此亟需形成量化的评价标准。

由于气候、植被、地形地貌等条件不同, 国内尚未编制出针对各个地区、地域的采集点云密度推荐值规范, 导致现场数据采集的过程

中, 由于植被覆盖程度的不同, 操作人员难以评估不同郁闭度条件下能够实际获取的地面点数量是否满足插值要求, 致使飞行成本上涨、数据冗余、数据存储空间要求过高和后期处理时间增加。从设备层面看, 由于机载 LiDAR 系统的定位精度限制, 当点密度超过定位精度就会形成大量噪点。

因此, 在数据采集的策略制定中, 必须综合考虑点云密度、数据处理的成本以及所需解译精度之间的平衡, 以实现数据采集和模型构建的最优化。

国内外关于机载 LiDAR 最优点密度的研究已经取得了一定的进展。王康康等多位学者用高程中误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 来评价不同点云保留率下 DEM 的精度<sup>[5-6]</sup>; Razak 等人<sup>[7]</sup>标注出微地貌的位置, 再分别通过专家组建议提供定性评价、RMSE 做定量精度评价的方式给出合适的微地貌拾取地面点密度。虽然 RMSE 的值表示了不同精度下 DEM 与原始地形的贴近程度, 但是不能解释微地貌的保留情况。Anderson 等多位学者<sup>[8-11]</sup>发现不同地形因子可以解释地形的变化情况, 唐钰涵和陈嘉阳等人<sup>[12-13]</sup>组合多种地形因子形成了一套复杂度计算的方法用于评价点云数据抽稀后地形特征的保留情况。虽然以上研究各有优点, 但是缺乏一种综合定性、定量且顾及多地形因子的针对地质灾害解译项目中微地貌提取的最优点密度确认方法。

针对这些问题本文提出一种最优采集点密度计算方法。在满足测绘标准所提出的 DEM 成果高程中误差的基础之上, 用目视解译做定性分析; 用多因子结合的地形复杂度公式做定量评判的框架; 用离散差寻峰法做复杂度曲线拐点的判识。最终, 通过穿透率反算获取不同比例尺下各郁闭所对应的最优采集点密度。本次研究以浙江省青田县作为示范区, 以本文结果作为依据对浙江茂密植被地区的机载 LiDAR 点云数据采集工作提供指导。



# 1 研究区概况

本次研究区位于丽水市青田县，测区内最高高程为 197.5m，最低高程为 17.6m，整体高差为 179.9m。山体原始地形坡度在 15°~35°，属低山丘陵地貌，调查区内地层由第四系地层

和志留系地层构成。调查区植被类型包含浙江省常见的各类阔叶乔木和经济种植作物（以竹子、茶园为主）。经过初步勘查发现该区域内存在多处已发灾害，可以从高精度的 DEM 中识别到滑坡边际、崩塌体范围以及拉张裂缝等丰富的微地貌特征（图 1）。

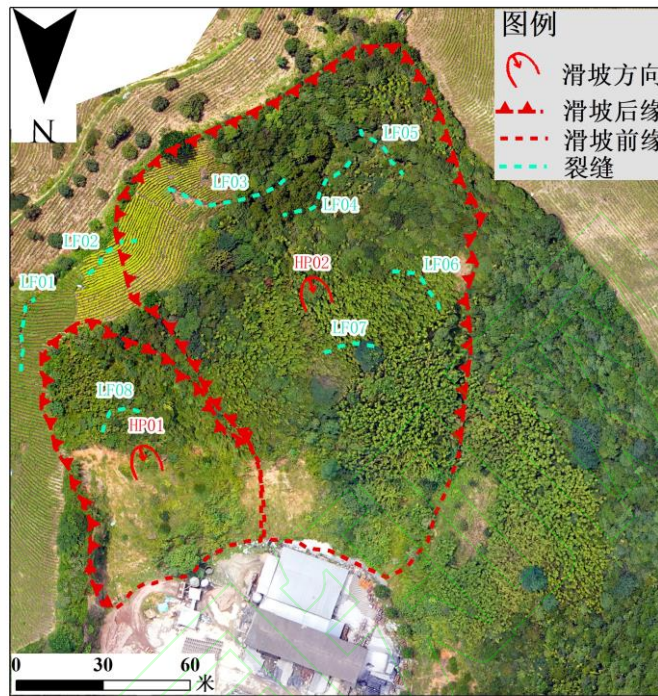


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of the study area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据获取与处理

本次研究的数据收集采用了飞马 D20 无人机，搭载 DV-LiDAR40 激光雷达模块同时搭载光学摄像头。数据采集时将激光雷达的点频调整至 150kHz，飞行高度与飞行速度分别为 200m 和 8m/s，使得平均采集点密度达到 246 点/平方米，以保证所获得的原始点云超出“最优”值。

对采集后的原始数据做解算得到点云，将系统部件之间的偏心角、偏心分量数据通过整体平差的方法解算出定向定位参数，以此改正飞行过程中的系统误差和航带偏移问题。之后，再通过 TerraSolid 软件对点云做去噪、滤波和分类操作。为获取表面光滑、连续，且分类结果与地形图、影像套合的地面点云，通过人工修正的方式对未剔除的噪点和分类错误的点做了手动调整。

### 2.2 最优采集点密度研究方法

#### 2.2.1 郁闭度分区

利用赵勋等<sup>[14]</sup>提出的基于二维冠层高度模型的郁闭度估测方法划分郁闭度单元。通过归一化处理圈定三种郁闭度范围，其中 0~0.2 为低郁闭度，0.2~0.69 为中郁闭度，0.7 及以上为高郁闭度。将点云数据导入，即可统计并求得激光穿透率。

#### 2.2.2 点云抽稀

由于无人机多次采样的工作量太大且难以操作，本次研究运用经处理及调整后的高密度点云作为数据源，对其做等间距的随机抽稀<sup>[15-17]</sup>。按照保留原有云点总数 90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%和 10%，共 9 个梯度进行抽稀。接着，分类出地面点并采用构建不规则三角网（Triangulated Irregular Network, TIN）的方式获取不同点云密度之下 1:200、1:500、1:1000 以及 1:2000 比例尺的 DEM 模型。

#### 2.2.3 DEM 地形因子选取

由于任意单独的地形因子都无法完整表达

不同微地貌的特征变化情况，因此许多学者采用多因子结合的方式来量化地形复杂度<sup>[18-19]</sup>。本文首先从常见的地形因子中，按照相对独立性和完整性的原则<sup>[20-21]</sup>粗选了坡度变率（Slope of Slope, SOS）、地表粗糙度（Terrain Ruggedness, TR）、地形位置指数（Terrain Position Index, TPI）、地形起伏度（Relief Amplitude, RA）、坡向变率（Slope of Aspect, SOA）五个地形因子，并提取高程中误差衡量是否满足测绘标准所提出的 DEM 精度要求。

本文利用 ArcGIS 中相应的栅格计算工具，基于不同比例尺和点云保留率下的 DEM 获取到 5 种地形因子值的样本集。该样本集是基于整个测区内所有栅格的地形因子计算结果。将每个栅格的因子计算结果表格导出之后，借助统计学软件进行 Pearson 相关性分析<sup>[22-23]</sup>。根据皮尔逊相关性指数越低，两个变量之间越不相关这个原则，和当 $|r| < 0.3$ ，可认为两变量基本不相关的结论，最终本文选择出三个地形因子：粗糙度、坡向变率和地形位置指数。

#### 2.2.4 评价指标的建立

本文选择 CRITIC（Criteria Importance Through Intercriteria Correlation）方法作为局部地形复杂度指标的系数权重方法<sup>[24]</sup>。该方法是根据各因子之间的对比强度和冲突性来赋予权重系数<sup>[12]</sup>。本文利用编程代码实现 CRITIC 权重系数自动计算，代码运行后会先将异常值剔除，并对含有异常值的栅格中的其余因子做掩膜，仅选择 3 个地形因子都有效的数据点做运算，确保各因子的样本总量保持一致。由于各因子间的量纲差异，代码对所有因子进行无量纲化处理，继而通过对比强度的计算求出因子中全部已过滤样本所表现出的差异程度（式 1）。差异程度越大，所包含的地表信息量越多。其中  $m$  为因子个数， $n$  为样本数， $\bar{Z}_i$  为第  $i$  个因子的样本均值， $Z_{ij}$  为第  $i$  个因子第  $j$  个样本值。

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2}{n-1}} \quad (1)$$

$i = (1, 2, \dots, m)$

接着做冲突性计算，以量化所有因子之间关系强度的综合影响（式 2）。其中， $m$  为因子个数， $r_{ik}$  为第  $i$  个和第  $k$  个因子间的相关系数。因子间的相关性越大，其冲突性越低。

$$\delta_i = \sum_{k=1}^m (1 - |r_{ik}|) \quad (2)$$

$i = (1, 2, \dots, m)$

继而把各因子的对比强度和冲突性结果相乘，获得每个因子的综合权重系数  $C_i$ 。为客观表现各因子权重占比，将计算的综合权重系数归一化，即  $\omega'_i$ 。

$$\omega'_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^3 S_i \delta_i} \quad (3)$$

其中， $C_i$  为第  $i$  个地形因子综合权重系数， $S_i$  为第  $i$  个地形因子的对比强度， $\delta_i$  为第  $i$  个地形因子的冲突性。

而后执行反无量纲化操作，获得最终的真实系数  $\omega_i$ 。

$$\omega_i = \frac{\omega'_i}{\bar{Z}_i} \quad i = (1, 2, 3) \quad (4)$$

其中， $\omega'_i$  为归一化后第  $i$  个地形因子的权重系数， $\bar{Z}_i$  为第  $i$  个地形因子的样本均值。

最终，由粗糙度（TR）、坡向变率（SOA）、地形位置指数（TPI）构建的实验区局部地形复杂度指标计算公式如式 5 所示。

$$TCI = \omega_{kr} \cdot Kr + \omega_{SOA} \cdot SOA + \omega_{TPI} \cdot TPI \quad (5)$$

#### 2.2.5 最优点密度计算

将最优点密度获取的步骤分为最优地面点密度和最优采集点密度两步。本文采用复杂度变化拟合曲线做离散差寻峰<sup>[23]</sup>——对每一个点云保留率所对应的数据点，向其前后分别取一段区间进行搜索（1%~5%的步长），并求得方差，即离散程度。用前半段区间的方差与后半段作差，获得一个离散差值曲线，该曲线中的极值点被认作边际效益出现的“转折点”。最终将该点对应的点云保留率输出，并统计该密度下各郁闭度区间的平均地面点密度，即最优地面点密度。通过以下公式反算不同比例尺下林分郁闭度的最优采集点密度：

$$\text{采集点密度} = \frac{\text{地面点密度}}{\text{激光穿透率}} \quad (6)$$

## 3. 结果

### 3.1 误差结果

在无人机设定的飞行工况下，测区平均点云密度可达到 246 点/m<sup>2</sup>（规范要求采集点云密度不低于 16 点/m<sup>2</sup>），远高于测绘标准



的规定，以确保抽稀之后的点云数据包含最优值。在没划分郁闭度的情况下总面积 116977m<sup>2</sup>，总点数 22785231 个，地面点 2922366 个，得到的测区平均地面点密度为 24.98 点/m<sup>2</sup>。

将未抽稀点云构建的 DEM 作为基准，

把抽稀后各比例尺下的 DEM 做高程中误差分析，除 1:200 比例尺尚不存在相关标准的规定，其余结果表明 DEM 成果的高程中误差均满足精度要求，且呈现出比例尺越小误差越大、点云保留率越少误差越大的特点，详细结果见下图：

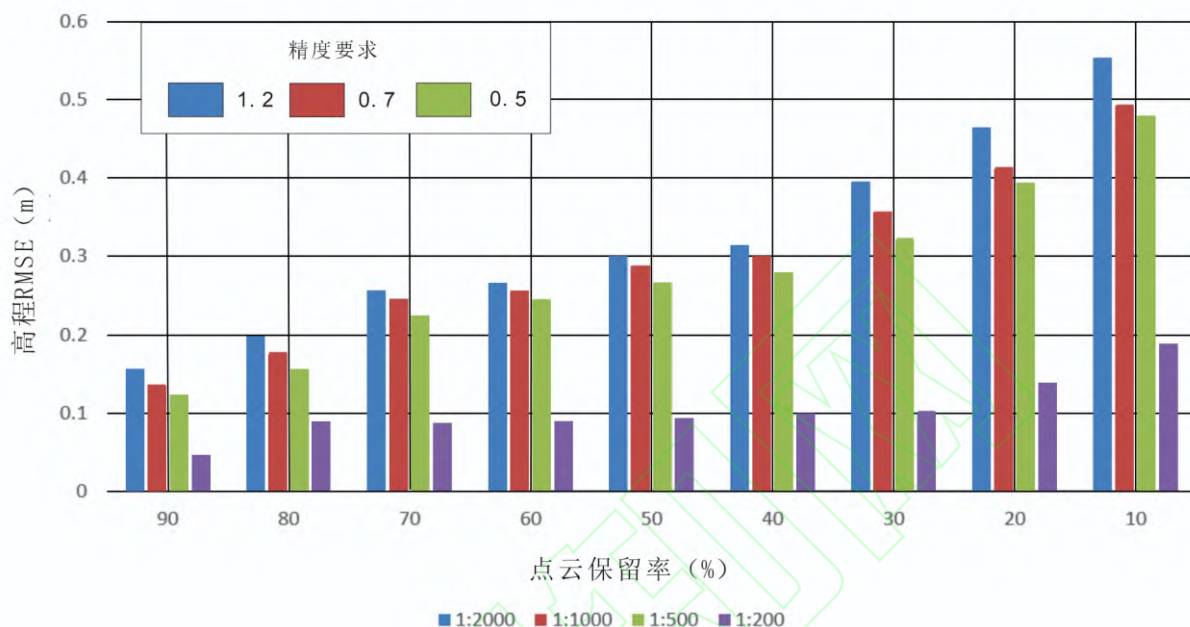


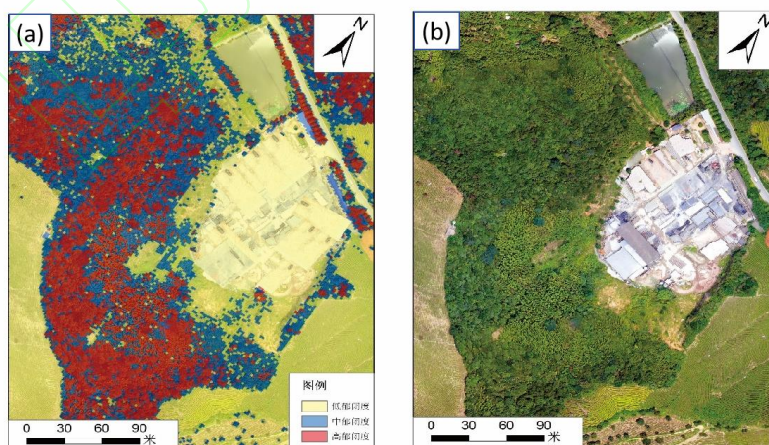
图 2 抽稀后各比例尺下 DEM 精度与规范对比图

Fig.2 Comparison chart of DEM accuracy and standards at different scales after thinning

### 3.2 定性结果

二维冠层高度模型的郁闭度估测方法经过归一化处理所得到的图像与测区的光学影像对比如图 3 所示。高大且树冠茂密的竹林

被自动划分为高郁闭度区域；高度稍微低矮的竹林则被标记为中郁闭度；测区内水面、房屋、裸地和茶园被标记为低郁闭度。



a. 郁闭度自动分区效果图；b. 正射影像图

图 3 郁闭度自动分区与正射影像对比图

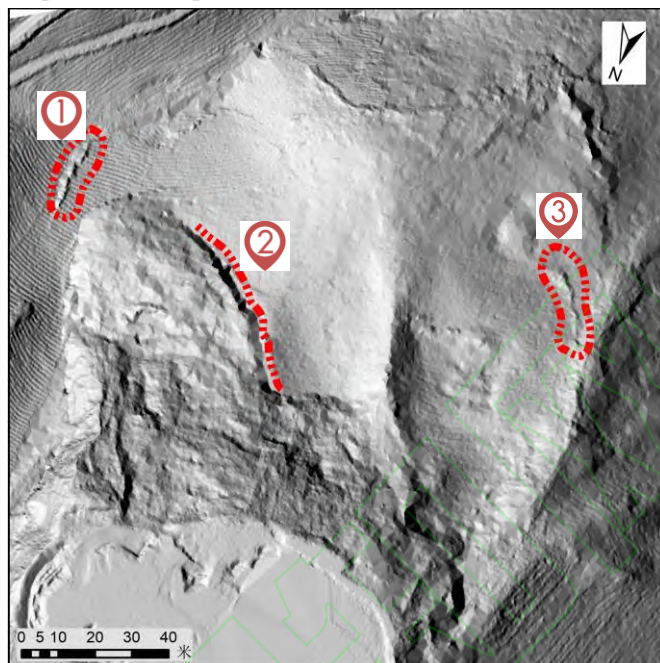
Fig.3 Comparison of automated canopy closure zoning map and digital orthophoto map

林分郁闭度不同灾害类型在 1:200 比例尺下各点云保留率的 DEM 目视解译效果对

比如图 4 所示。随着抽稀的进行，DEM 的细致程度逐渐降低，甚至出现不规则三角网格。

在三种郁闭度条件下保留 60%（高中低郁闭度下平均地面点密度分别为 2.14pt/m<sup>2</sup>、6.79pt/m<sup>2</sup>、27.53pt/m<sup>2</sup>）的点云所生成的 DEM 与原始高密度点云结果相似，但是 10%保留率下（高中低郁闭度下平均地面点密度分别为 0.36pt/m<sup>2</sup>、1.14pt/m<sup>2</sup>、

4.62pt/m<sup>2</sup>）的 DEM 未能达到目视解译的标准。同样通过对比发现在更小的比例尺下难以通过人眼分辨出点密度的增加（从保留 10% 到 60%）对 DEM 精度带来的提升。因此，需要采用复杂度变化曲线的离散差寻峰法定量分析最优点密度。



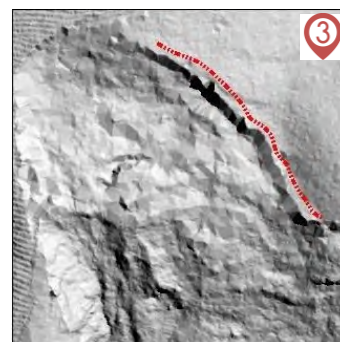
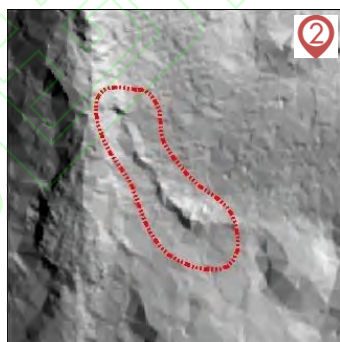
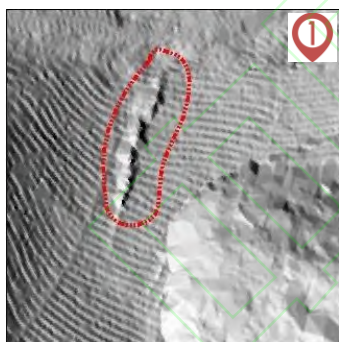
点云保留率 (%)

低郁闭度[0, 0.2) 地裂缝

中郁闭度[0.2, 0.69) 地裂缝

高郁闭度[0.7, 1] 滑坡边界

100



60

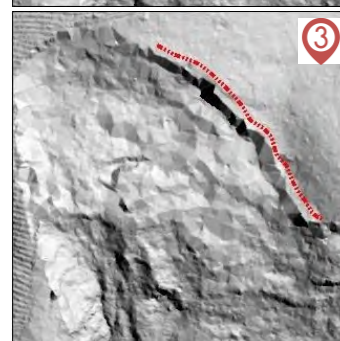
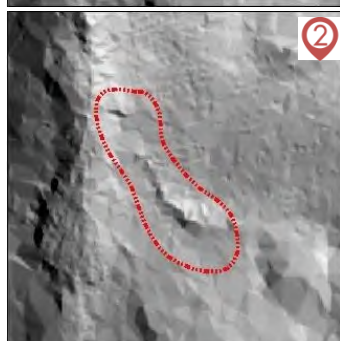
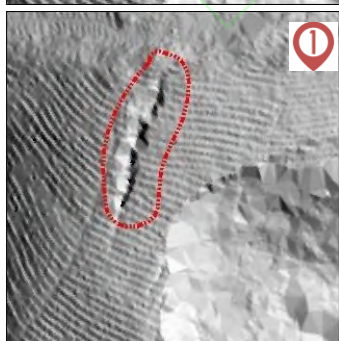






图 4 比例尺 1:200 不同点云保留率 DEM 目视解译效果

Fig.4 Visual interpretation of DEM at 1:200 scale with different point-cloud retention rates

### 3.3 定量结果

目视解译做定性分析之后，对所有个案进行相关性分析，结果如表 1 所示。粗糙度与坡向变率之间的皮尔逊相关性指数为-0.194、粗糙度与地形位置指数之间的皮尔逊相关性指数为 0.068、坡向变率与地形位

置指数之间的皮尔逊相关性指数为 0.065，三者互相之间的皮尔逊相关性指数的绝对值都小于 0.3，彼此之间为低相关。按照相对独立性和完整性的原则粗糙度、坡向变率和地形位置指数被选为本项目适合的地形因子。

表 1 地形因子间的皮尔逊相关性矩阵

Tab. 1: Pearson correlation matrix among terrain factors

地形因子	粗糙度	起伏度	坡向变率	坡度变率	地形位置指数
粗糙度	1	0.766	-0.194	0.165	0.068
起伏度	0.766	1	-0.230	0.274	0.117
坡向变率	-0.194	-0.230	1	0.279	0.065
坡度变率	0.165	0.274	0.279	1	0.202
地形位置指数	0.068	0.117	0.065	0.202	1

经过 CRITIC 权重系数计算的结果如下表所示：

表 2 CRITIC 权重系数结果统计表

Tab. 2: CRITIC weight coefficient results table

地形因子（项）	对比强度	冲突性	综合权重系数	归一化权重系数	真实权重系数
粗糙度 TR	0.164	1.629	0.266	0.002	0.002
坡向变率 SVR	85.539	1.585	135.579	0.988	0.011
地形位置指数 TPI	0.835	1.620	1.353	0.01	0.022

由此得到的最终复杂度计算公式为：

$$TCI = 0.002 \cdot TR + 0.011 \cdot SVR + 0.022 \cdot TPI \quad (7)$$

通过对不同抽稀度下 DEM 的地形因子值进行提取并带入式 7，取所有样本单元的 TCI 做算术平均值用来表示不同比例尺下局部地形复杂度平均值变化曲线（图 5）。随着比例尺与点云数量的增大，所生成的

DEM对微地貌的保留程度增加，因此局部复杂度平均值曲线呈现出逐步增长的趋势，且 1:200 比例尺下的复杂度数值上最高。进一步对每条曲线进行离散差寻峰，得到复杂度变化的转折点（图 6）。



复杂度平均值与保留率关系图

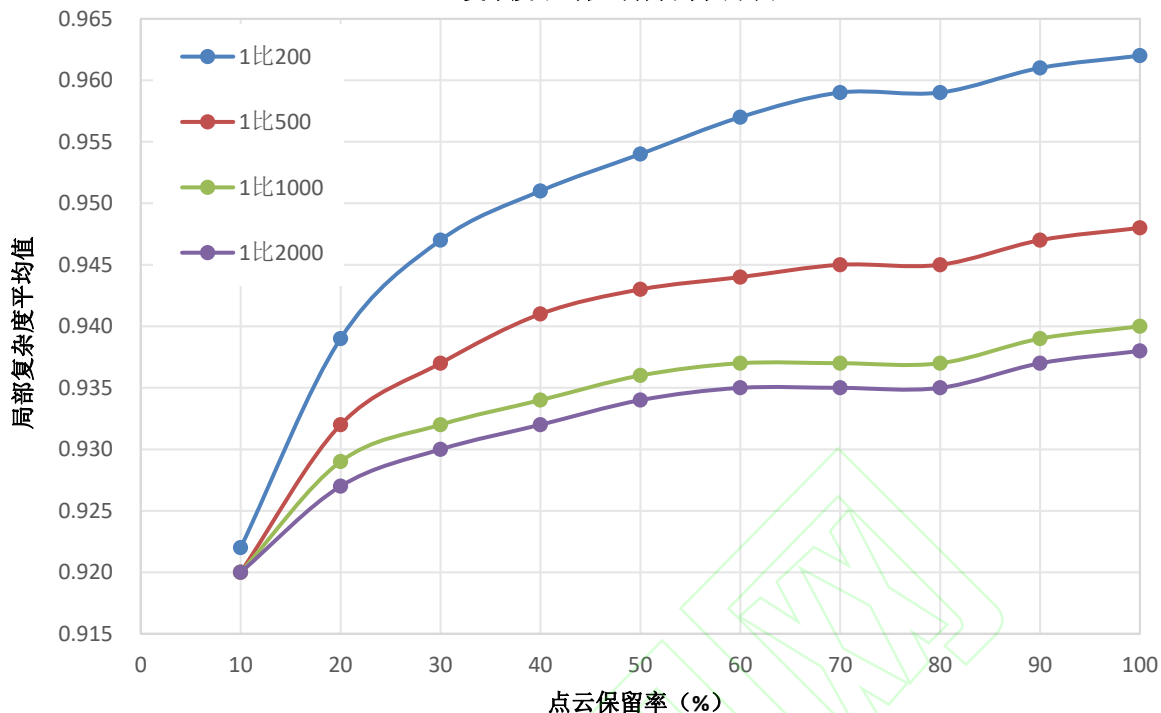
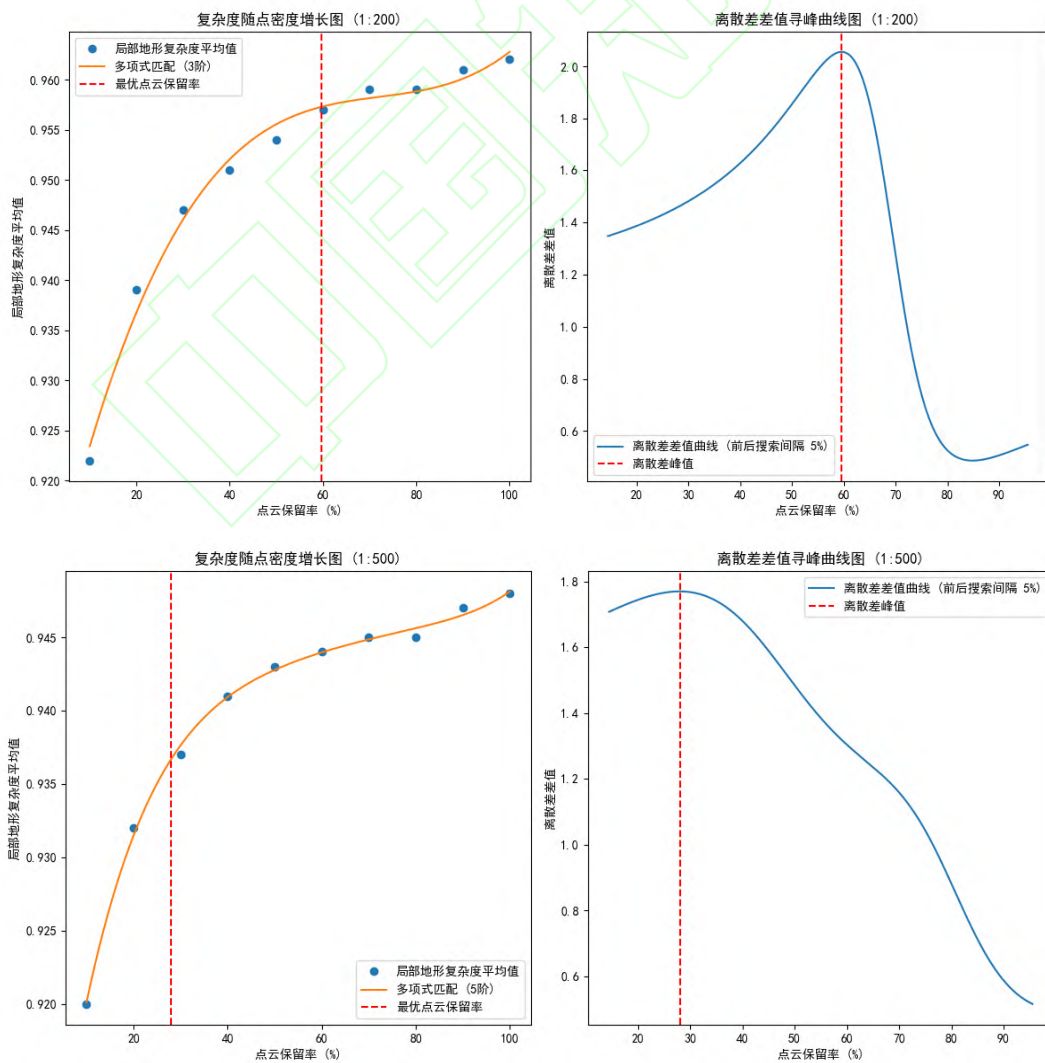


图 5 复杂度平均值与点云保留率变换趋势

Fig.5 Averaged complexity trends in relation to point-cloud retention rates



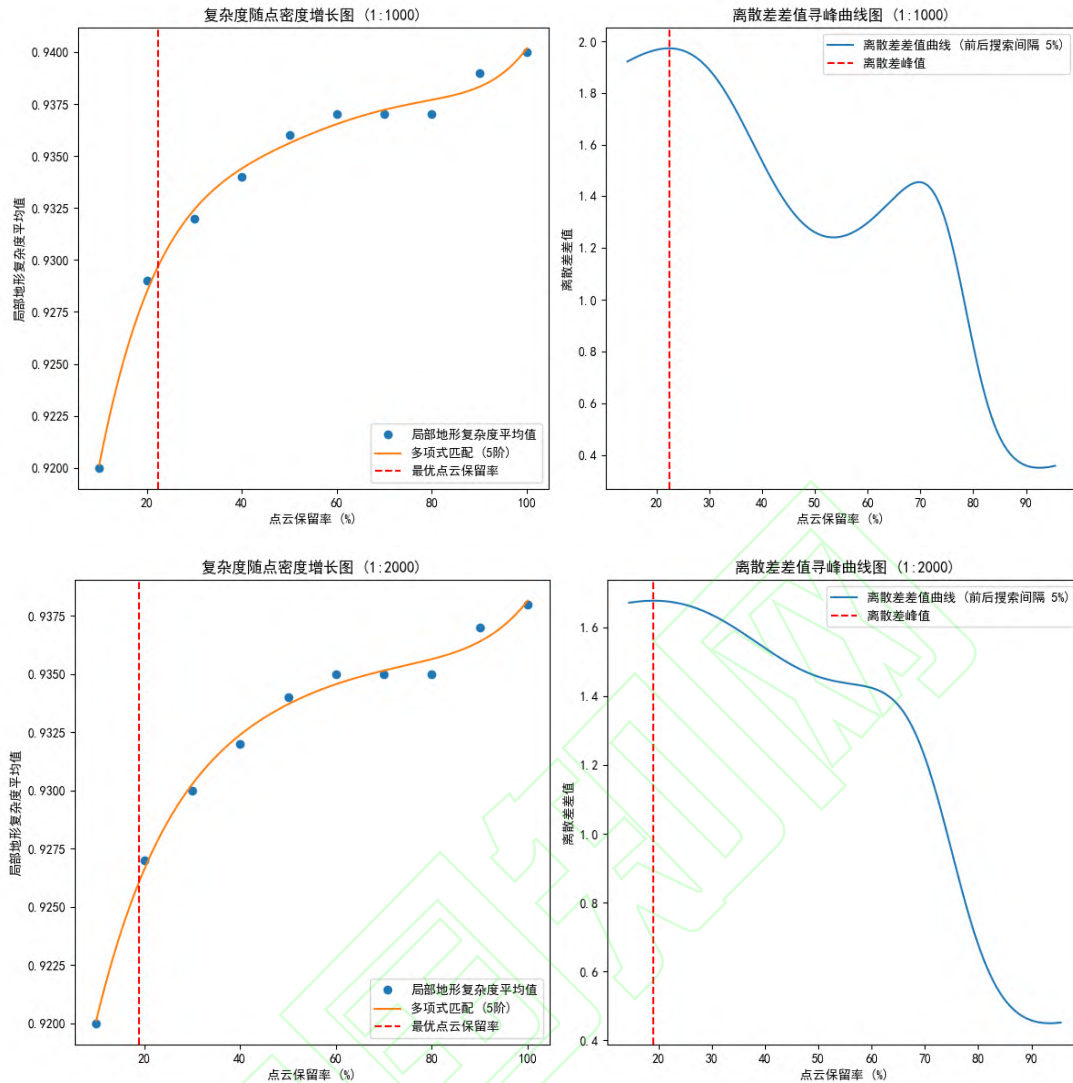


图 6 离散差值寻峰曲线及最优点密度

Fig.6 Peak-Finding curve of discrete difference values and optimal point density

因为其前后端无法做差值计算，差值寻峰曲线的两端未参与计算，所以在图 5（右）中呈现出收敛态势。随着比例尺的减小，调查的目标也从裂缝转变为滑坡边界这类规模更大的微地貌要素，然而形态规模上更大的要素受点密度的影响较小，在图 5 中则表现为比例尺越小，最优点云保留率越低、复杂度变化趋势越平。

为提高准确性，由算法尝试不同的多项式拟合阶数，同时动态调整区间搜索步长，根据数据分布特点选择了最适拟合阶数和步长（表 3）。离散差寻峰曲线图中的红线指出了某点前后离散差值最大的点，即为复杂度增长速率转折点，认为该点之后随着点云数量的增加，微地貌保留程度的提升变慢。由此认定该峰值对应的点为最优点云保留率。

表 3 最优点云保留率对应区间搜索步长及多项式拟合阶数表

Tab. 3: Table of search step length and polynomial fitting order corresponding to optimal point-cloud retention rate

比例尺	区间搜索步长 (%)	多项式拟合阶数	最优点云保留率 (%)
1:200	5	3	59.6
1:500	5	5	28.0
1:1000	5	5	22.4
1:2000	5	5	19.0

将原始采样点云和地面点云按照图 6 所示的郁闭度分区统计了落在各区间中的面积

和点数，再根据公式（6）做计算，获得各郁闭度区间下平均郁闭度所对应的激光穿透

率，如表 4 所示。

表 4 原始采集点密度、地面点密度及平均郁闭度对应的激光穿透率统计表

Tab. 4: Table of laser penetration corresponding to original collection point density, ground point density and average canopy

林分郁闭度	面积 (m <sup>2</sup> )	采集点密度 (点/平方米)	地面点密度 (点/平方米)	激光穿透率 (%)
[0.7, 1]	29474.90		3.59	1.46
[0.2, 0.69)	35258.12	246	11.39	4.63
(0, 0.2)	52243.98		46.22	18.79

结合离散差寻峰所得到的点云保留率和郁闭度统计下的点云密度及激光穿透率，反算求得各不同调查比例尺下各郁闭度对应最优推荐采集点密度 (表 5)。其中，最优地面点密度取未抽稀点云在高郁闭度下的地面

点统计结果作为基准，在此基础上乘以最优地面点密度；最优采集点密度则是取公式 (6) 的计算结果和测绘规范要求的点密度的最大值，并采取向上取整获得。

表 5 不同调查比例尺下各郁闭度区间对应最优推荐采集点密度表

Tab. 5: Table of optimal recommended sampling point densities for various canopy closures at different survey scales

调查比例尺	林分郁闭度	穿透率 (%)	最优地面点密度 (点/平方米)	推荐最优采集点密度 (点/平方米)	测绘标准点云密度 (点/平方米)
1: 200	[0.7, 1]	1.46	2.14	≥147	未规定
	[0.2, 0.69)	4.63		≥47	
	(0, 0.2)	18.79		≥16	
	裸地	100.00		≥16	
1: 500	[0.7, 1]	1.46	1.01	≥70	≥16
	[0.2, 0.69)	4.63		≥22	
	(0, 0.2)	18.79		≥16	
	裸地	100.00		≥16	
1: 1000	[0.7, 1]	1.46	0.81	≥56	≥4
	[0.2, 0.69)	4.63		≥18	
	(0, 0.2)	18.79		≥5	
	裸地	100.00		≥4	
1: 2000	[0.7, 1]	1.46	0.68	≥47	≥1
	[0.2, 0.69)	4.63		≥15	
	(0, 0.2)	18.79		≥4	
	裸地	100.00		≥1	

## 4. 讨论

### 4.1 地形因子的选择

坡度变率是地形坡度的变化率，即坡度的坡度，在一定程度上反映了地表高程的变化率，表征了一个平缓变化的面突然出现波动，对应了地质灾害识别当中的滑坡边界、地裂缝、洼地、岩溶漏斗等地形要素；地表粗糙度反映了局部区域的表面积与其投影面积之比，该参数反映了地面信息的复杂程度，如果粗糙度越小，则地表特征越光滑，可能保留的微地貌特征就越少；地形位置指数是某点高程值与该点邻域内其他点的高程平均值之差，本次研究遍历了每个栅格和其周围

100×100 栅格的平均值，该值越大说明局部地形变化越剧烈；地形起伏度反映了特定区域里最高点海拔和最低点海拔的极差，其取值的变化可以表征滑坡边界、错台陡坎的突然出现；坡向变率是对提取的坡向再次求坡度，反映了等高线的弯曲程度，该因子表征了地表局部微小范围内坡向的最大变化情况。

综上，所选因子高度贴合了微地貌调查的理念。根据皮尔逊相关性计算结果，从粗选的 5 个地形因子减少到 3 个，既避免了单一因子对微地貌特征的描述不够全面，又保证了所选因子之间彼此的相对独立和完整性。

### 4.2 离散差寻峰

本文结合目视对比、高程中误差和局部地形复杂度指标三种判别方法，对 DEM 模



型进行评价，解决了目视对比无法量化评价且主观影响较大的问题，同时也避免了高程中误差只对高程精准度做评价，无法量化微地貌特征保留程度的问题。

离散差寻峰是针对拟合后的局部地形复杂度变化曲线做分析。本方法是一种创新性的分析方法，假设了地形复杂度随点密度的增加先是快速提升，随后提升速度减慢，这是边际效益递减原理的体现。

综合看来，该方法找到了一个符合直观分析的最优点，显示了一个合理的点密度，超过这个密度，复杂度的增幅开始减少。但之中的两个重要参数——区间大小（即前后区间的长度）和多项式拟合阶数可能会显著影响结果，换不同的实验者或者测试区可能导致该方法无法被复现，而且人为的参数调整可能会造成过度拟合或欠拟合。为了提高该方法的普适性，本文通过算法优化实现了自动过滤最优拟合阶数和搜索区间长度的方法。

但是从数据特性上来看，如果数据在本质上比较简单或者趋势明显，那么低阶的多项式（如 3 阶）可能已经足够好地捕捉到数据的主要特征。更高阶的多项式可能不会提供更好的拟合，甚至可能导致过拟合。

结合本次研究的搜索结果，代码首先尝试 3 阶拟合，然后是 5% 的搜索步长。如果这些参数已经能满足寻找最优点云保留率的条件（例如，最优密度落在期望的范围内），那么代码就不会继续尝试更高阶的拟合或更大的搜索步长。这就导致了所有的最优解都是首次尝试的步长参数（即 5%）。

#### 4.3 最优点密度

根据表 4 推荐最优采集点密度的结果可以看出，当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。当调查对象所处区域混杂不同郁闭度的植被时，应当采用稍高于最优采集点密度的值进行数据采集。

比例尺的选择受灾害规模和微地貌要素特征的体量、地势复杂情况、点密度和其分布等的影响。根据不同的调查需要，类似滑坡边界这样尺度的微地貌可以在 2m 的分辨率下被视觉感知到，但是危岩体结构面、微小裂缝以及岩溶漏斗之类的地貌特征则可能

丢失掉。同理，当考虑采用 1:2000 比例尺（即 2m 分辨率）调查滑坡边界时，形态规模上更大的要素受点密度的影响较小，反应为更小的最优点密度。

因此，在讨论最优点密度之前，应该先限定最适合调查目标对象的比例尺。目前学术领域缺乏对最优比例尺的研究，这同样也是本文的不足。后续研究可面向不同规模的灾害调查，先找到最适合整体研究区的 DEM 分辨率，再根据本文提到的方法确定点云采集密度。

## 5. 结论

随着比例尺的细化和点云密度的增加，DEM 的精度会提高，但同时数据量和工作量也会增加。因此本文引入“最优点密度”的概念，并使用边际效益的经济学原理来衡量点云密度与数据处理效益之间的关系，理论上，当边际效益开始减少时，即可以认为达到了最优点密度。

视觉判别因为无法量化分析 DEM 模型之间的差异，前人评判 DEM 精细化程度多是通过高程中误差。这虽然能表现 DEM 与真实地形之间的差别，但是无法体现出微地貌保留程度。本研究提出了一种提取地形因子计算 DEM 复杂度的方法，结合了目视对比、高程中误差和局部地形复杂度指标三种判别法，从定性到定量、从单一到多源，对微地貌保留程度进行了完整的评价。

本文通过算法实现了离散差寻峰参数的自动匹配，并应用到微地貌评价体系中，通过解译局部地形复杂度曲线，得到了不同比例尺和郁闭度对应的最优采集点密度，为在浙江省植被茂密地区使用机载 LiDAR 作业的人员提供了参考。如需获取植被茂密地区 1:200 调查比例尺之下适于地质灾害解译工作的 DEM，需要不少于 147 点/m<sup>2</sup> 的平均采集点密度；1:500 对应的是 70 点/m<sup>2</sup>；1:1000 对应 56 点/m<sup>2</sup>；1:2000 对应 47 点/m<sup>2</sup>。

本研究提出的流程化“最优点密度”找寻方法同样适用于地质灾害解译之外的众多领域，如考古学影像分析、农、林业植物影像处理、水电及其他基础设施建设中的多期巡检影像对比等。

## 参考文献(References)

- [1] 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. DOI: 10.13203/j.whugis.20220151 (董秀军, 邓博, 袁飞云等. 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. DOI: 10.13203/j.whugis.20220151)
- [2] SUN Tao, XU Mingyu, DONG Xiujun, PAN Xing. Application of airborne LiDAR technology in geological hazard investigation in mountainous area with dense vegetation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021, 0(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. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0117)
- [3] GUO Chen, XU Qiang, DONG Xiujun, LIU Xiaosha, SHE Jinxing. Geohazard Recognition by Airborne LiDAR Technology in Complex Mountain Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1538-1547. DOI: 10.13203/j.whugis.20210121 (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. DOI: 10.13203/j.whugis.20210121)
- [4] PAN Xing, SHE Jinxing, DONG Xiujun, YANG Wunian. Early Recognition of Landslide Hazards by Airborne LiDAR Technology — A Case Study of Yantian District, Shenzhen [J]. SURVEYING AND MAPPING, 2020, 43(6): 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]. 测绘通报, 2020, 43 (6): 243-247.)
- [5] 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, 0(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. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0155)
- [6] WANG Kangkang, ZHENG Xuedong, LAI Xudong. Research on the Relationship between Airborne LiDAR Point Cloud Density and DEM Product Accuracy[J]. JOURNAL OF GEOMATICS, 2021, 46 (3): 78-82. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2018432 (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 (3): 78-82. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2018432)
- [7] Razak, Khamarrul Azahari et al. "Airborne laser scanning of forested landslides characterization: terrain model quality and visualization." Geomorphology 126 (2011): 186-200.
- [8] LI Dehui. Analysis and Research on Terrain Factor Extraction Based on Different Resolution DEMs[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2021, 23 (1): 1-5+17. (李德辉. 基于不同分辨率 DEM 的地形因子提取的分析研究 [J]. 测绘技术装备, 2021, 23 (1): 1-5+17.)
- [9] LIU Yicheng, LIU Bin, XIA Yan, BI Zenghui. DEM construction of light airborne LiDAR data in complex mountainous areas with different point densities [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023, (S1): 32-35. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2023.0507 (刘一成, 刘斌, 夏炎等. 不同点密度下复杂山区轻型机载 LiDAR 数据 DEM 构建 [J]. 测绘通报, 2023, (S1): 32-35. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2023.0507)
- [10] Anderson, S E, Tompson, et al. LiDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates[J]. The International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(18), pp.3889-3900.
- [11] 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, Vol. 35, No. 4, 1496-1510.
- [12] TANG Yuhan. A Thinning Method for Airborne LiDAR Ground Point Cloud Data Based on Local Terrain Complexity Index [D]. Southwest Jiaotong University, 2019. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2019.001924 (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, 2019. DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2019.001924)
- [13] CHEN Jiayang, BU Xianhai, CHEN Diancheng, YUN Tianyu, YANG Fanlin. Multi beam point cloud thinning algorithm considering terrain complexity factor weights[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41 (5): 21-29. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkj.zk.022.05.003 (陈嘉阳, 卜宪海, 陈殿称等. 顾及地形复杂度因子权重的多波束点云抽稀算法 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41 (5): 21-29. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkj.zk.022.05.003)
- [14] ZHAO Xun, YUE Cairong, LI Chungang, GU Lei, ZHENG Guofei. Estimation of Forest Canopy Density based on Airborne LiDAR Point Cloud Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35 (5): 1136-1145. (赵勋, 岳彩荣, 李春干等. 基于机载 LiDAR 点云数据森林郁闭度估测 [J]. 遥感技术与应用, 2020, 35 (5): 1136-1145.)
- [15] SUN Xuna, LIU Xiaoming, QU Weixia, PAN Wei, ZHAO Wei, WANG Qiulin, YOU

- Yuanzheng ,WANG Shumu ,SONG Chao. Multi beam point cloud thinning algorithm considering terrain complexity factor weights [J]. *Modern Mining* , 2022, 38(2): 68-71+75.(孙旭娜,刘晓明,曲伟霞等. 顾及地形特征的露天矿倾斜摄影测量 DEM 数据抽稀算法 [J]. *现代矿业*, 2022, 38 (2): 68-71+75.)
- [16] BEI Yixuan, CHEN Chuanfa, WANG Xin, SUN Yanning, HE Qinxin, LI Kunyu. Effects of Airborne LiDAR Point Cloud Density and Interpolation Methods on the Accuracy[J]. *Journal of Geo-information 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.)
- [17] JIANG Hu. Automatic identification and stability analysis of rock mass structural planes based on UAV photogrammetry[D]. Chongqing Jiaotong University, 2023. DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.000489 (蒋辉. 基于无人机摄影测量的岩体结构面自动识别与稳定性分析[D]. 重庆交通大学, 2023. DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.000489)
- [18] LU Huaxin, LIU Xuejun, TANG Guoan. Terrain Complexity Assessment Based on Multivariate Analysis[J]. *Mountain Research* ,2012, 30 (5): 616-621.DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.05.011.(卢华兴,刘学军,汤国安. 地形复杂度的多因子综合评价方法 [J]. *山地学报*,2012, 30 (5): 616-621. DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.05.011)
- [19] XUE Meijiao. Calculation of terrain complexity in loess hilly and gully areas based on DEM [D]. Xi'an University of Science and Technology , 2018. (薛玫娇. 基于 DEM 的黄土丘陵沟壑区地形复杂度测算[D]. 西安科技大学, 2018.)
- [20] The spatial pattern and geographical characteristics of terrain complexity in Xinjiang [J]. (张雪莹,张正勇,刘琳等. 新疆地形复杂度的空间格局及地理特征 [J]. *地理研究*, 2022, 41 (10): 2832-2850.)
- [21] ZHANG Lei. Research on Spatial Pattern of Loess Landform Based on Core Terrain Factor Analysis [D]. Nanjing Normal University, 2013. (张磊. 基于核心地形因子分析的黄土地貌形态空间格局研究[D]. 南京师范大学, 2013.)
- [22] WANG Zehui, YUE Linfeng. Comparative Analysis of Spatial Interpolation of Annual Precipitation in Hunan Province [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2019, 33 (11): 1318-1322. DOI:10.19580/j.cnki.1007-3000.2019.11.006 (王泽辉,岳林峰. 湖南省年均降水量空间插值比较分析 [J]. *北京测绘*, 2019, 33 (11): 1318-1322. DOI:10.19580/j.cnki.1007-3000.2019.11.006)
- [23] WU Fu, LIAO Zeyuan, HE Na, LIU Chang, WU Qiuju, MO Yingfei, PAN Xingyu, JIANG Yaojing, LI Chunling, HUANG Xin, WANG Yuxiang, DONG Xiujun. 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*. DOI: 10.13203/j.whugis20230386 (吴福,廖泽源,何娜等. 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)*, 1-11[2024-01-03] <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230386>.)
- [24] Diakoulaki, D.; Mavrotas, G.; Papayannakis, L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Comput. Oper. Res.* 1995, 22, 763-770.

### 网络首发:

标题: 植被茂密山区机载激光雷达数据采集最优点密度试验研究

作者: 陈邦松, 司马劲松, 赵光祖, 董秀军, 雷文权, 陈庭轩, 何秋霖

收稿日期: 2024-06-11

DOI:10.13203/j.whugis20240097

### 引用格式:

陈邦松, 司马劲松, 赵光祖, 等. 植被茂密山区机载激光雷达数据采集最优点密度试验研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240097 (CHEN Bangsong, SIMA Jingsong, ZHAO Guangzu, et al. Optimal Point Density of Airborne LiDAR Data Collection for Hazards in Mountainous Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240097)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:



### 融合区域生长的 DS-InSAR 相位优化与应用

杜玉玲, 闫世勇, 张豪磊, 赵峰, 仇春平

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 216-224.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210365>

### 综合遥感解译 2022 年 Mw 6.7 青海门源地震地表破裂带

张成龙, 李振洪, 张双成, 王建伟, 占洁伟, 李鑫沆, 刘振江, 杜建涛, 陈博, 孟岭恩, 朱武, 付鑫, 余琛, 周保, 隋嘉, 赵利江, 王祖顺, 辛兵厂, 徐江明, 张勤, 彭建兵

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1257-1270.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220243>

### 复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究

郭晨, 许强, 董秀军, 刘小莎, 余金星

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1538-1547.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210121>

### 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考

许强

武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200043>

