

## 机载LiDAR技术在广州黄埔区地质灾害调查中的应用

李文龙

Application of airborne LiDAR technology in geological hazard investigation in Huangpu District, Guangzhou City

LI Wenlong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305016>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 机载LiDAR与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用

Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiashai collapse in Shuicheng, Guizhou

党杰, 董吉, 何松标, 范宣梅 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 106-113

#### 无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65

#### 基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

#### 实景三维技术在“8·8”九寨沟地震地质灾害快速调查中的应用

Application of real-scene 3D technology in the rapid survey of geological disasters after the “8·8” Jiuzhaigou earthquake

赵婷婷, 高文娟, 李志林, 廖露, 陈笑峰 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 93-99

#### 海洋地质灾害原位监测技术研究进展

Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards

贾永刚, 陈天, 李培英, 李正辉, 胡聪, 刘晓磊, 单红仙 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(3): 1-14

#### 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价

Susceptibility assessment of geological hazards in Wuhua District of Kunming, China using the weight evidence method

白光顺, 杨雪梅, 朱杰勇, 张世涛, 祝传兵, 康晓波, 孙滨, 周琰嵩 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(5): 128-138



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305016

李文龙. 机载 LiDAR 技术在广州黄埔区地质灾害调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 164-172.

LI Wenlong. Application of airborne LiDAR technology in geological hazard investigation in Huangpu District, Guangzhou City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 164-172.

# 机载 LiDAR 技术在广州黄埔区地质灾害调查中的应用

李文龙<sup>1,2,3</sup>

(1. 广州城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510060; 2. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心, 广东 广州 510060; 3. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室, 广东 广州 510060)

**摘要:**近年来, 机载 LiDAR 技术快速发展, 其能够“穿透”地面植被, 获取地面真实高程, 对于精准获取地质灾害隐患点具有重要意义。为查明广州黄埔区地质灾害发育特征, 文章基于机载 LiDAR 技术获取了黄埔区总面积为 526.5 km<sup>2</sup> 的三维点云和数字正射影像等数据, 结合传统人工现场调查手段, 查明项目范围内的典型地质灾害发育特征。解译结果表明: 调查区内地质灾害呈面状和线状分布, 主要集中在中北部山区丘陵地带, 其他地区零星分布或无分布, 崩塌及危岩体类地质灾害 435 处、滑坡及不稳定斜坡类地质灾害 1 027 处, 极端天气情况下可能诱发的低频泥石流灾害 66 处, 以滑坡及不稳定斜坡类灾害为主; 此外, 区内地质灾害发育规律与地形地貌、地质条件、工程活动及降雨等因素具有较强的关联性, 其中降雨诱发地质灾害较为显著, 灾害多发生在月降雨量 650~700 mm 区间。研究表明, 机载 LiDAR 技术能够实现研究区内地质灾害的识别, 对指导识灾减灾工作具有较好的指导作用和应用价值。

**关键词:**工程地质; 地质灾害; 机载 LiDAR 技术; 防灾减灾

**中图分类号:** P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2024)06-0164-09

## Application of airborne LiDAR technology in geological hazard investigation in Huangpu District, Guangzhou City

LI Wenlong<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510060, China; 2. Guangzhou Collaborative Innovation Center of Natural Resources Planning and Marine Technology, Guangzhou, Guangdong 510060, China; 3. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou, Guangdong 510060, China)

**Abstract:** In recent years, airborne LiDAR technology has developed rapidly, allowing for the penetration of ground vegetation and the accurate acquisition of ground elevation, which is of great significance for precisely identifying geological hazard points. In order to understand the development characteristics of geological disasters in Huangpu District, Guangzhou, this study utilized airborne LiDAR technology to obtain three-dimensional point cloud and digital orthophoto images covering a total area of 526.5 km<sup>2</sup> within district. Combined with traditional manual field investigation methods, the study identified the typical geological disaster development characteristics within the project scope. The interpretation results indicate that

收稿日期: 2023-05-17; 修订日期: 2023-12-07

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心项目(2023B04J0301; 2023B04J0326); 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金项目(2020B121202019); 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司科技基金项目(RDI2220204031; RDI2230204019)

作者简介: 李文龙(1996—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察、地质灾害评估工作。

E-mail: [1240431411@qq.com](mailto:1240431411@qq.com)

geological disasters within the investigation area are distributed in both surface and linear patterns, mainly concentrated in the hilly areas of the central and northern parts, with scattered or no distribution in other areas. There are 435 instances of geological disasters such as collapses and dangerous rock masses, 1 027 instances of geological disasters such as landslides and unstable slopes, and 66 instances of low-frequency debris flow disasters that may be induced under extreme weather conditions, with landslides and unstable slope disasters being predominant. Additionally, the development pattern of geological disasters in the area exhibits a strong correlation with topography, geological conditions, engineering activities, and rainfall. Rainfall is notably significant in inducing geological hazards, with disasters occurring mainly within the range of monthly rainfall between 650 and 700 mm. The study demonstrates that airborne LiDAR technology can achieve the identification of geological disasters within the study area, providing valuable guidance and application value for guiding disaster identification, prevention, mitigation, and management.

**Keywords:** engineering geology; geological hazards; airborne lidar technology; disaster prevention and mitigation

## 0 引言

广州市黄埔区地理位置优越以及交通便利,是广深港澳科技创新走廊的重要节点,区域内花岗岩发育,岩体经地质构造运动,形成网格状的构造节理裂隙,在长期风化作用中,沿裂隙薄弱位置由表及里经历剥蚀、冲刷,最终残留球形或近球形花岗岩孤石分布在山体覆盖层中,且大多被植被覆盖。因此,针对地质环境和潜在地质灾害实施风险区划,科学地防治地质灾害、合理地规划城市的发展布局,为地方发展保驾护航尤其重要<sup>[1]</sup>。

相较于传统调查方法,机载 LiDAR 技术具有自动化程度高、数据生产周期短、精度高、能穿透植被等特点,用于测量地面物体的三维坐标前景广阔<sup>[2-7]</sup>。因此,采用机载 LiDAR 技术解决植被覆盖率高、的黄埔区山地地区地质灾害识别的难题,具有较强的针对性和适用性<sup>[8-11]</sup>。机载 LiDAR 技术能一定程度地“穿透”地表植被,获取地面真实地形特征,可以快速获取地面高精度三维空间信息和高分辨率光学影像,并且实现隐蔽性灾害的识别与信息提取。目前,已广泛应用于西南山地地区地质灾害调查工作中<sup>[12-16]</sup>。

广州市黄埔区山体植被覆盖率高,传统地质调查手段存在一定困难。本文通过传统地质灾害调查方法与当前已发展成熟的机载 LiDAR 新技术相结合<sup>[17-19]</sup>,查明广州市黄埔区内存在的危岩体、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的发育特征、分布规律以及形成的地质环境条件,对调查区地质灾害现状进行遥感解译,通过新技术对地质灾害动态发展趋势进行综合分析<sup>[20]</sup>。

## 1 调查区工程地质条件及地质灾害现状

### 1.1 地理条件与地质构造

黄埔区处于广州市中心以东,珠江北岸,珠江与东

江下游出口交汇处,全区面积 484.17 km<sup>2</sup>,地势平坦,以低山、平缓台地和阶地丘陵为主。

黄埔区处于华南准地台(一级构造单元)湘桂赣粤褶皱系(二级构造单元)粤中拗褶束的中部,增城凸起西南部。区域性活动构造文冲断裂与瘦狗岭—罗浮山大断裂分别在场区南部 4~8 km 处通过。地质资料显示,调查区附近存在的主要断裂为南东—北西走向及近北—西走向,分别为瘦狗岭断裂和狮子洋断裂,断裂构造被第四系所覆盖,绝大部分均深埋地下<sup>[21]</sup>。黄埔区地层由老到新揭露有元古界、白垩系、古近系和第四系地层,分别分布在黄埔区北部、西南部、东南部。

### 1.2 水文地质条件及人类活动

黄埔区内水系发育,河流较多。地下水类型为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。降雨渗入是黄埔区低丘台地地下水主要补给来源。区内人类工程活动剧烈,主要的人类工程活动为城市发展建设,工业厂房建设,地下空间开发,矿产资源开发建设,道路交通建设,水利水电工程建设及农业开发建设等。人类工程活动已成为改变地形地貌和影响地质环境条件的主要动力,是诱发各种斜坡地质灾害的主要因素。

### 1.3 地质灾害现状

黄埔区地质灾害具有“点多面广”的分布特点,灾害类型多为崩塌、滑坡、泥石流,在南部软土区域发育地面沉降。由于黄埔区人类工程活动较为强烈,因此区内地质灾害诱因主要以削坡建房为主,多为中小型规模,灾害体紧邻房屋,灾害发生时,直接经济损失较大。崩塌、滑坡灾害体积多为几方至几十方,易发性较高,诱发因素多为“龙舟水”、台风期间的连续强降雨;泥石流灾害主要为低频小流量泥石流,易发性较低,可能在极端天气的影响下,会引起小范围的浊流冲出。

## 2 工作方法及内容

### 2.1 工作仪器

机载 LiDAR 技术是激光雷达主动发射多回波激光束,通过机载激光发射器的激光束获取与目标物之间的距离,可高效便捷获取大范围的三维地形地貌信息。其具有精度高、适用性强,无视植被覆盖等优点。本次使用 Teledyne Optech 公司生产的 ALTM Galaxy T 1000 激光雷达系统,集成长距离、高精度激光传感器和惯性导航系统,每发射一次脉冲最多可返回 8 次,可保证较高的垂直密度,满足不同环境下的测绘任务,其传感器尺寸为 0.34 m×0.34 m×0.25 m,扫描角度为 10°~60°,激光等级为 4 级,通常测距高度为 150~4 700 m,相对水平精度为高度的万分之一,绝对高程精度小于 0.03~0.20 m,脉冲频率 35~1 000 kHz,扫描频率为 0~120 Hz,外挂 Phasics 高分辨数字相机,有效像素为一千万。

### 2.2 工作方法及内容

采用机载 LiDAR 技术时,为合理制定航摄规划,需综合考虑测区范围、飞机的安全航高,激光点云密度、飞行速度、影像的航向以及旁向重叠度等指标。在确保航摄安全航高的前提下尽量获取高的点密度,平均点云密度优于 40 点/m<sup>2</sup>。

本文采用机载 LiDAR 技术,通过航摄飞行、数据处理、联合解算等流程在广州市黄埔区内获取了总面积为 526.5 km<sup>2</sup> 的影像数据、航片外方位元素及三维点云数据(图 1)。

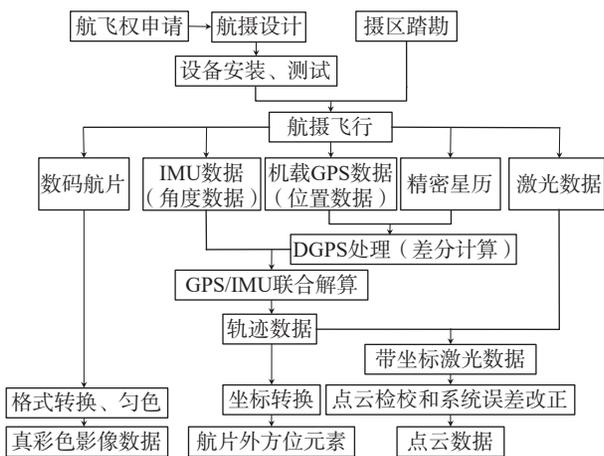


图 1 机载 LiDAR 数据处理流程

Fig. 1 Data processing process of airborne LiDAR

预处理后的激光点云数据是包含地面点、植被点、建筑物点等多个目标三维坐标点的集合,采用构建规则网格、不规则三角网等方式,根据点云数据中的植被点、建筑物点构建数字表面模型(digital surface model,

DSM);根据点云数据中的地面点构建 0.2 m 高分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM),因此,受惠于机载 LiDAR 独特的穿透植被、高分辨率的优点,可以较好地反演目标区域的地形地貌信息,为辨灾识灾提供了先决条件。此外,结合机载 LiDAR 搭载无人机拍摄的原始影像数据,通过影像拼接、正射校正、镶嵌融合等手段构建数字正射影像(digital orthophoto image, DOM)。

## 3 机载 LiDAR 遥感调查成果解译

### 3.1 解译内容及精度

为查明项目范围内的典型地质灾害及潜在威胁,进一步探究地质灾害的发育特征及影响因素,在充分收集、研究黄埔区地质、地理背景的基础上,通过野外踏勘总结地质灾害遥感解译标志特征,建立研究区内的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害点的解译标志,通过三维模型、二维影像相结合的遥感解译技术方法,开展孕灾背景及地质灾害解译识别,以从整体到局部再到整体的解译原则完成解译工作,最后通过野外验证的方式辅助支撑解译工作。

综上,本文在已有数字表面模型、数字高程模型、数字正射影像、解译标志的基础上,基于三维成果及其他地质资料,结合传统人工现场调查手段,以调查区内高精度数字高程模型和山体阴影图为主要解译对象,以调查区高分辨率的数字正射影像为辅助解译,查明区内地质灾害底盘底数及分布特征。

解译内容主要包括崩塌、滑坡、泥石流、危岩体以及不稳定斜坡。解译精度为面积大于 20 m<sup>2</sup> 的孕灾地质体或长度大于 20 m 的形变线状地质体。

### 3.2 地质灾害解译标志建立

机载 LiDAR 技术可穿透植被,建立的模型可清晰展示地表形态及潜在地质灾害隐患地质信息,为地质灾害隐患识别、稳定性分析提供帮助。

本文通过机载 LiDAR 获取的数字表面模型、数字高程模型及数字正射影像,通过标志提取、分类,提出了不同地质灾害类型的解译标志(表 1),并选取典型崩塌、滑坡及泥石流地质灾害详细阐述解译过程(表 2)。

## 4 解译结果及分析

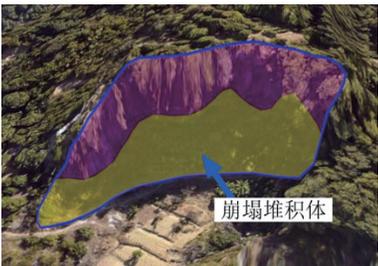
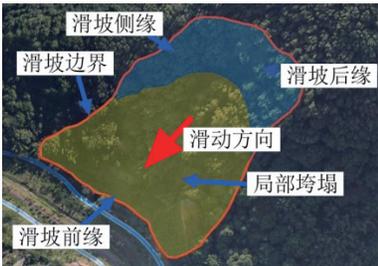
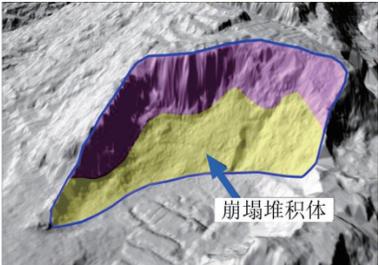
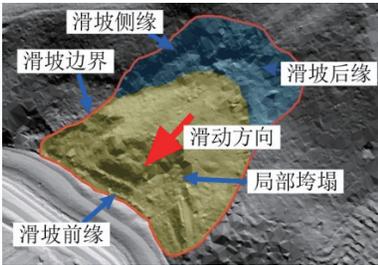
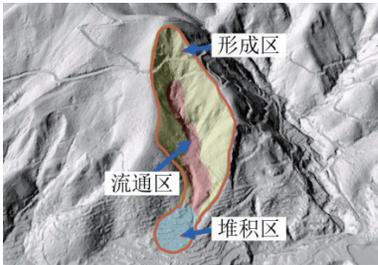
### 4.1 解译结果

黄埔区地质灾害呈面状和线状分布,主要集中在黄埔区中北部,其他地区零星分布或无分布(图 2)。地质灾害分布主要受地形地貌、岩土体特性等地质环境条

表 1 主要解译内容及标志  
Table 1 Main interpretation contents and symbols

类型	解译标志
滑坡	滑体位置、地貌部位、范围、形态、坡度、高程、沟谷发育状况、植被发育状况、总体滑动方向、与重要建筑物的关系等
崩塌	崩塌位置、形态、分布高程；崩塌堆积体的坡度、面积、发育方向、植被类型
泥石流	流域的边界、面积、形态、主沟长度、主沟纵降比、坡度；物源区水体分布、集水面积、地形坡度、岩性、植被覆盖程度、植物类别及分布状况，崩塌、滑坡、断裂、松散堆积物等不良现象，形成泥石流固体物质的分布范围；流通区沟床的纵横坡度、冲淤变化以及泥石流痕迹，阻塞地段堆积类型、跌水、急弯、卡口情况等
危岩体	危岩体多发生在节理裂隙发育岩质山坡与峡谷陡岸上，坡度通常在 $55^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ，上陡下缓，表面坎坷不平，具粗糙感，偶出现巨大块石影像；危岩体上部外围有时可见到张节理形成的裂缝影像
不稳定斜坡	不稳定斜坡位置、形态、分布高程、堆积体面积、斜坡范围内InSAR形变数据分布

表 2 调查区内典型地质灾害解译影像及过程  
Table 2 Typical geological hazards interpretation images and processes in the survey area

类别	崩塌	滑坡	泥石流
三维光学影像			
三维数字高程模型			
解译过程	崩塌多发育在陡峭山体或公路开挖边坡处，其物源区与堆积区交接处明显。在 LiDAR 数据上表现为滑源区坡度较大并可能伴随局部拉花，向堆积区过渡时则坡度突然变缓，有明显的陡缓交界线；堆积区呈现三角形或梨形，处于地形低处，表面粗糙度特征与环境差异较大，但新近堆积粗糙度大颗粒感明显，古老堆积则粗糙度小较光滑	对于光学影像，若坡面植被较多，通常无法进行滑坡识别；此时 LiDAR 获取的数字高程模型能去除掉表面的干扰信息，很好地识别滑坡边缘的滑体缺失和前缘堆积体，滑坡后缘椅状地貌、滑坡下错迹象、滑坡表面粗糙度差异，因此滑坡边界十分清楚，关于滑坡的解译可很好体现机载 LiDAR 数据区别于传统影像滑坡解译的优势	泥石流以发育地形、堆积扇和沟道范围内的不良地质体作为人工综合解译标志。泥石流沟谷为低于原有平面的负地形地貌，多为雨水汇聚通道；同时沟道内不良地质体的存在为泥石流提供可流动物源；在降雨条件下可流动物源区内泥石流堆积扇受人改造程度严重，很难发现堆积扇范围边界

件影响，降雨和人类活动是地质灾害的重要诱发因素。区内地势整体由东北向西南倾斜，地貌以山地丘陵为主，山地丘陵主要分布于黄埔区中部和北部，与地质灾害的空间分布相吻合；基岩岩性以花岗岩为主，花岗岩风化残积土遇水易软化，易发育崩塌、滑坡地质灾害，且地势起伏越大，灾害发生频率越高。

遥感解译成果表明黄埔区内地质灾害具有危害性较大、隐蔽性高、突发性强等特征，共解译出疑似地质灾害点共 963 处，其中崩塌 642 处、滑坡 110 处、泥石流 65 处、危岩体 24 处、不稳定斜坡 122 处。崩塌多发育于黄埔区中北部山地丘陵地区，南部偶有发育；滑

坡、泥石流发育于黄埔区中北部山地丘陵地区；危岩体多发育于黄埔区中南部低矮丘陵的花岗岩地区。

虽然，机载 LiDAR 技术在灾害识别领域具有精度高、穿透性好等优势，但是也存在一定的局限性。研究发现，在人工现场调查及室内解译过程中，研究区内地质灾害多为削坡建房，且村民房屋之间的距离较近，即“握手楼”，导致传统的人工调查仅能覆盖研究区内较少的地质灾害点。此外，由于研究区内植被茂盛，裸露的边坡较少，对于绝大部分紧邻房屋、植被茂盛的地质灾害点，不仅现场调查很难发现，而且传统的遥感调查也无法有效识别。

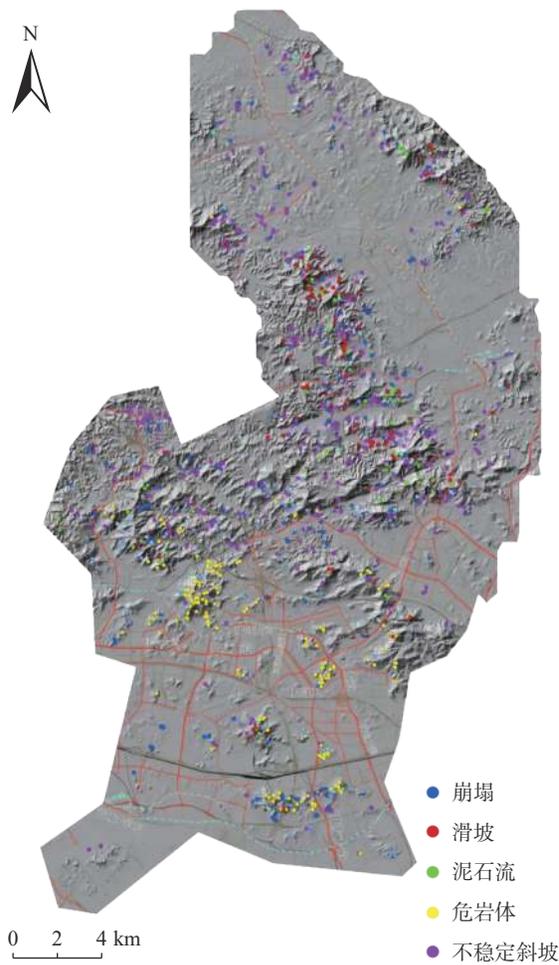


图 2 调查区机载 LiDAR 遥感解译成果图

Fig. 2 Interpretation result map of airborne LiDAR remote sensing in the investigation area

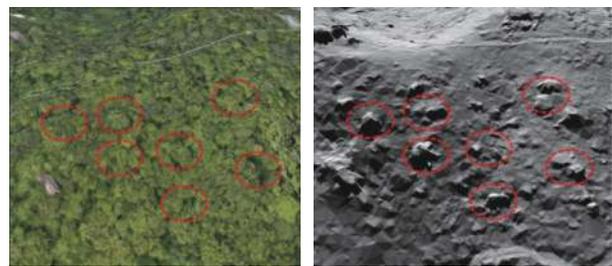
## 4.2 解译成果野外复核

### 4.2.1 野外复核情况

由于遥感解译的随机性、模糊性和多解性以及植被遮挡, 裸露地面较少等原因, 区域内地质灾害解译存在较大困难。为验证遥感解译结果的准确性, 本文选取了 497 处解译成果进行野外复核, 复核结果显示, 198 处为已有地质灾害点, 已列入政府管控; 288 处为本次遥感解译发现的新增地质灾害点, 均具有一定程度的风险性; 11 处为已经完成工程治理并消除风险的历史地质灾害点。经野外验证统计, 本次遥感解译野外复核的准确率达到 97% 以上, 表明遥感解译成果可靠有效。此外, 针对房屋与边坡距离较近、“握手楼”、边坡坡度较大等情况, 地质灾害识别效果显著下降, 经与区内原有地质灾害点数据对比, 结果表明机载 LiDAR 技术识别地质灾害存在漏检情况, 漏检数目为 127 处, 漏检率为 8.3%。

### 4.2.2 野外复核典型案例

黄埔区发育主要危岩体以花岗岩球形风化孤石为主, 孤石群成片分布于山间斜坡上, 主要形式为裸露孤石或植被覆盖下隐蔽孤石群。以黄埔区典型林下孤石群为例, 由图 3(a)可知, 黄埔区林下孤石群多呈椭球状, 具有大小不一、分布较广、基座埋藏不均、多为植被覆盖等特点, 通过常规三维光学影像等调查方式很难发现。机载 LiDAR 技术调查精度高, 能够一定程度“穿透”植被, 对于黄埔区危岩体等地质灾害的判别具有独特的优势。由图 3(b)可知, 滤除植被后的三维数字高程影像能够去掉表面干扰信息, 完整地表现地表形态, 可直观观察到孤石群三维形态表现较好, 孤石间界线清晰可见, 同时可见该斜坡表面较为粗糙, 危岩体发育区域呈灰暗灰色调, 纵断面与横断面凸起明显, 危岩体可见局部变形破坏。



(a) 三维光学影像 (b) 三维数字高程影像

图 3 调查区内典型林下危岩体

Fig. 3 Typical understory hazardous rock mass in the survey area

## 4.3 地质灾害发育及分布规律

结合区域地质灾害解译、地质灾害现场巡查、政府群测群防巡查成果及区域基本地质资料, 本文将调查区内典型地质灾害分为以下 3 种类型: 受岩体结构和人类工程活动影响的崩塌及危岩体类地质灾害(435 处)、受人类工程活动和地形影响的滑坡及不稳定斜坡类地质灾害(1 027 处), 极端天气情况下可能诱发的低频泥石流灾害(66 处)。为进一步探明地质灾害发育规律, 总结出 4 类关联因素, 分别是地形地貌(高程、坡度、坡高、坡向)、地质条件(距断层的距离)、工程活动及降雨。

### 4.3.1 地形地貌对地质灾害的影响

调查区的主要人类工程活动分布在海拔高程 0~200 m 范围内。不同海拔高程范围内的植被类型、植被密度及地形地貌均有一定的差异, 进而影响灾害的分布特征。

图 4—7 为地质灾害分布特征与高程的关系图, 由图可知, 统计结果表明, 崩塌及危岩体、滑坡及不稳定

斜坡主要分布在 40~160 m 范围内;泥石流主要分布在 140~200 m。随着高程的上升,灾害分布数量均呈递减规律。

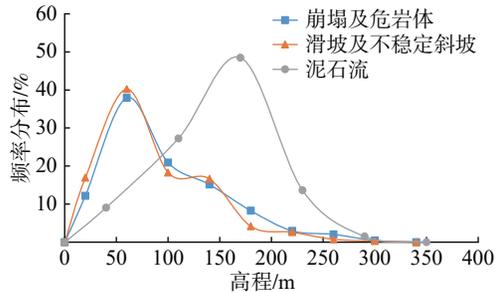


图 4 地质灾害分布特征与高程的关系

Fig. 4 Relation between distribution characteristics of geological hazards and elevation

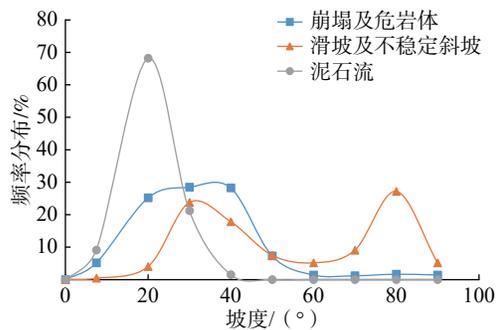


图 5 地质灾害分布特征与坡度的关系

Fig. 5 Relation between distribution characteristics of geological hazards and slope gradient

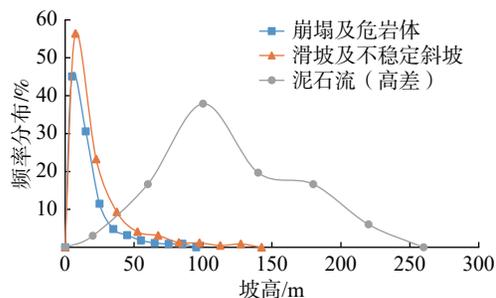


图 6 地质灾害分布特征与坡高的关系

Fig. 6 Relation between distribution characteristics of geological hazards and slope height

坡度及高差不仅会直接影响灾害发育情况,还会通过影响地表水径流、地下水的补给和排泄以及斜坡上松散物质的堆积等要素间接影响灾害的分布特征。本文利用 0.2 m 分辨率的数字高程模型提取坡度、坡高因子,结果显示调查区内崩塌及危岩体主要分布在 15°~45°范围内;滑坡及不稳定斜坡主要分布在 25°~45°及 75°~85°范围内,其中 75°~85°范围内主要分布人类削

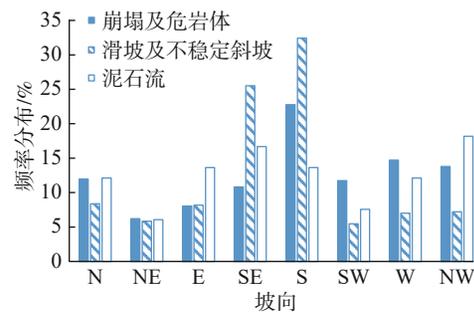


图 7 地质灾害分布特征与坡向的关系

Fig. 7 Relationship between distribution characteristics of geological hazards and slope aspect

坡建房及削坡修路后形成的不稳定斜坡;泥石流随着坡度的变化大致呈抛物线变化,且在 15°~30°范围内分布较多。崩塌及危岩体主要的坡高范围为 0~30 m,滑坡及不稳定斜坡的坡高范围主要为 0~45 m,泥石流前后缘高差大致集中在 40~200 m。

由图 7 可知,崩塌及危岩体、滑坡及不稳定斜坡在各个方向均有分布,主要分布在南向和东南向,主要是由于区内孕灾斜坡多为削坡建房,因此朝向多为南向或东南向。其中南及东南方向分布最多。

#### 4.3.2 岩土体类型对地质灾害的影响

岩土体类型是发育地质灾害的基础,岩土体的抗风化能力、强度、应力分布等参数依赖于岩石的类型和软硬程度。此外,不同性质的岩石及其组合因其岩性组合、坚硬程度和岩体结构的差异,地质灾害的类型及发育特征也不相同,不同的地层单元由于其岩性特征及类型差异对地质灾害敏感性的影响也显著不同。根据调查区的地层类型,将其划分为 12 个类型(图 8)。调查结果表明,区内岩土体类型多为上志留统~下白垩统花岗岩,地质灾害多分布于  $S_3\eta\gamma$  上志留统纪片麻状细粒黑云母二长花岗岩、 $T_3\eta\gamma$  上三叠统细-中粒斑状黑云母二长花岗岩等地层。

#### 4.3.3 断裂对地质灾害的影响

断裂是评价地质区域稳定性的重要因素之一,是地质灾害重要的影响因素。根据统计及现场调查的结果,对其与疑似地质灾害点进行空间叠加后,提取断层要素进行分析(图 9),结果显示,该区域的地质灾害与断层存在一定程度的相关性,主要分布在距断层 1 000 m 以内,各类灾害随着距离断层的距离增大发生概率呈降低趋势。

#### 4.3.4 工程活动对地质灾害的影响

调查区内主要城市区域、道路修建、房屋建设以及人类工程措施活动的进行对于灾害的发生具有显著的

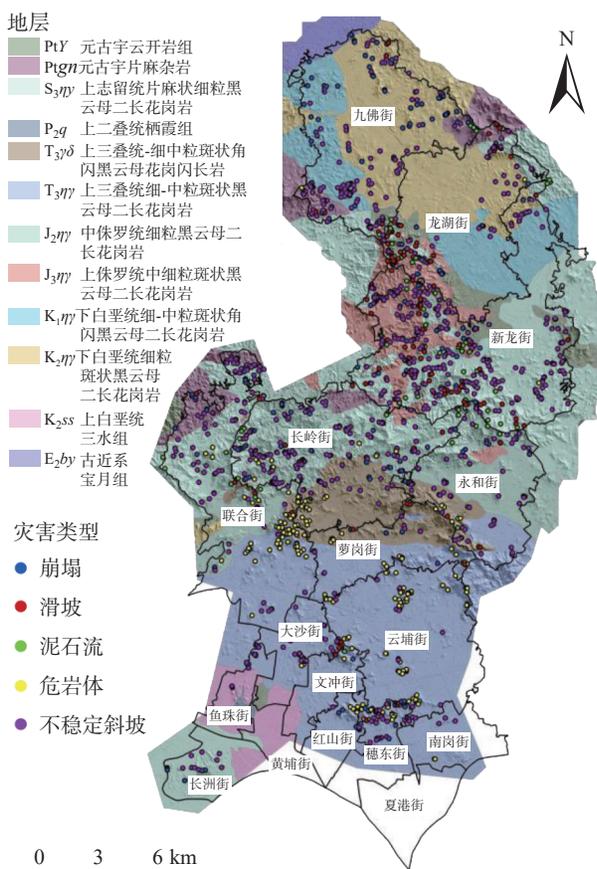


图 8 地质灾害分布特征与岩土体类型的关系

Fig. 8 Relation between distribution characteristics of geological hazards and rock and soil type

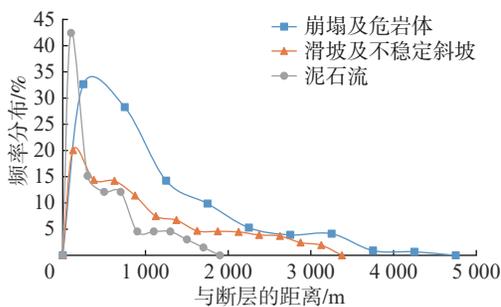


图 9 地质灾害分布特征与断层距离的关系

Fig. 9 Relationship between distribution characteristics of geological hazards and distance to faults

影响。工程活动在施工过程中的边坡开挖、坡脚开挖、弃方堆积等都改变了地质环境,直接或间接对地质灾害的发生起到一定的影响作用。因此,对各灾害点分别测量其与人类工程活动的距离,从而统计人类工程活动对灾害的影响程度(图 10)。结果显示调查区内地质灾害点数量随着距离人类工程活动距离增加而直线性下降,崩滑类灾害的递减效应尤为明显,泥石流受人类工程活动的影响相对较小,崩滑类灾害主要分布在距人类工程

设施 0~220 m 距离范围内,泥石流的分布范围相对较广,主要在 0~500 m 范围内。

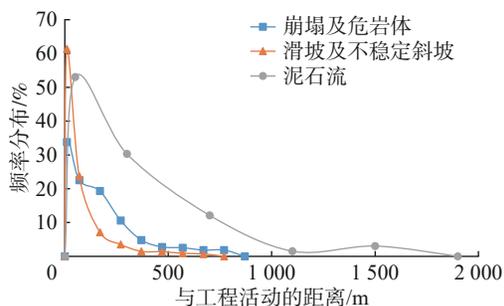


图 10 地质灾害分布特征与工程活动距离的关系

Fig. 10 Relationship between distribution characteristics of geological hazards and distance from engineering activities

### 4.3.5 降雨条件对地质灾害的影响

广州市黄埔区具有降雨时间分布集中、年降雨量充沛、短时强降雨量大、续降雨量多等降雨特点,每年汛期暴雨频繁,强降雨极易引发浅层土质滑坡和局部岩体掉块崩塌等地质灾害。降雨一方面在斜坡表面产生大量面状径流,对斜坡表面进行侵蚀破坏,不断带走斜坡表面岩土体颗粒,同时促进了雨水的下渗;另一方面入渗进斜坡岩土体内部,填充土体孔隙,导致土体含水率增大,重度增加,坡体下滑力明显增加。此外,土体逐渐由不饱和状态转变为饱和状态,土体遇水软化,黏聚力降低,孔隙水压力迅速增加,土体内有效应力减小,斜坡内部逐渐产生破裂面,进而在自身重力影响下向下蠕滑。

本文基于调查区内 17 个测雨站点 10 年的降雨量数据,对月平均降雨量进行分析,分析地质灾害与降雨量分布的关系(图 11)。统计结果显示,调查区内地质灾害数量随着降雨量的变化大致呈抛物线变化,区内月降雨量多为 650~700 mm,且灾害多发生在该区间内。

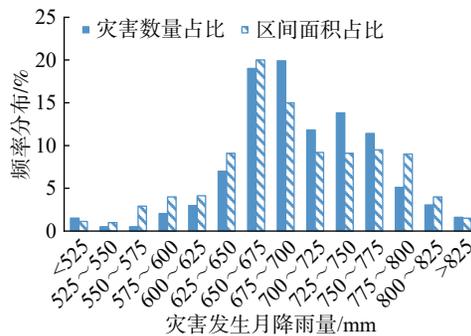


图 11 地质灾害分布特征与月降雨量的关系

Fig. 11 Relationship between distribution characteristics of geological hazards and monthly precipitation

## 5 结论

(1)机载 LiDAR 具有高穿透率、高分辨率等特点,能够解译广州市黄埔区高植被覆盖区域的隐蔽地质灾害及其孕灾背景,具有较强的针对性和适用性,是卫星光学遥感和无人机低空摄影测量技术的有益补充,对防灾减灾具有重要意义。

(2)通过遥感调查获取了广州黄埔区地区高分辨率机载 LiDAR 数据及高清倾斜数据,结合野外复核工作,查明调查区内地质灾害呈面状和线状分布,主要集中在黄埔区中北部,其他地区零星分布或无分布,主要为崩塌及危岩体类地质灾害 435 处、滑坡及不稳定斜坡类地质灾害 1 027 处,极端天气情况下可能诱发的低频泥石流灾害 66 处;对于房屋与边坡距离较近、“握手楼”、边坡坡度较大等情况,机载 LiDAR 技术识别效果受限。

(3)通过机载 LiDAR 技术结合传统人工现场调查及统计结果可知,调查区内地质灾害发育规律与地形地貌、地质条件、工程活动及降雨等因素具有较强的关联性,对指导灾灾避灾减灾工作具有较好的指导作用和实用价值。

## 参考文献(References):

- [1] 冯振,陈亮,王立朝,等.区域地质灾害易发性评价的证据权法原理与实践[J].地质通报,2024,43(7):1255-1265. [FENG Zhen, CHEN Liang, WANG Lichao, et al. Principle and application of the weight-of-evidence method in regional landslide susceptibility assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(7): 1255 - 1265. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王明辉,曹熙平,谯立家.危岩体精细调查与崩塌过程三维场景模拟——以西南某水电站高边坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(6):86-96. [WANG Minghui, CAO Xiping, QIAO Lijia. Comprehensive analysis of hazardous rock mass and simulation of potential rockfall processes using 3D terrain model: A case study of the high cut slope near damsite of a hydropower station in southern China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 86 - 96. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 贾会会,薛建志,郭利召,等.“空天地”一体化技术在采空区形变监测中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):69-82. [JIA Huihui, XUE Jianzhi, GUO Lizhao, et al. Application of combined space, arial and ground based multiple technologies in deformation monitoring of mining areas [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 69 - 82. (in Chinese with English

abstract)]

- [4] 张小红.机载激光雷达测量技术理论与方法[M].武汉:武汉大学出版社,2007. [ZHANG Xiaohong. Theory and method of airborne LiDAR measurement technology [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese)]
- [5] 薛强,张茂省,董英,等.基于DEM和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例[J].中国地质,2023,50(3):926-942. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing: Taking Mizhi County in the Loess Plateau of northern Shaanxi as an example [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 926 - 942. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 韩娜娜,单新建,宋小刚.高空间分辨率数字高程模型测量技术及其在活断层研究中的应用[J].地震学报,2017,39(3):436-450. [HAN Nana, SHAN Xinjian, SONG Xiaogang. VHR DEM measurement technology and its application in active fault research [J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(3): 436 - 450. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 孙鑫喆,唐声权.光学遥感技术的发展及其在活动构造研究中的应用[J].地震地质,2016,38(1):211-220. [SUN Xinzhe, TANG Shengquan. The development of optical remote sensing technology and its application to the active tectonics research [J]. Seismology and Geology, 2016, 38(1): 211 - 220. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 - 966. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈松,陈长敬,罗士新,等.广州南沙厚覆盖区近地表地层结构分析:基于二维地球物理多方法探测结果[J].地质通报,2023,42(1):168-179. [CHEN Song, CHEN Changjing, LUO Shixin, et al. Near surface stratigraphic structure analysis in Nansha of Guangzhou thick overburden area: based on multi method results of 2D geophysics exploration [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 168 - 179. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 邵延秀,张波,邹小波,等.采用无人机载LiDAR进行快速地质调查实践[J].地震地质,2017,39(6):1185-1197. [SHAO Yanxiu, ZHANG Bo, ZOU Xiaobo, et al. Application of uavls to rapid geological surveys [J]. Seismology and Geology, 2017, 39(6): 1185 - 1197. (in Chinese with English abstract)]

- [ 11 ] 刘圣伟, 郭大海, 陈伟涛, 等. 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用研究 [ J ] . 中国地质, 2012, 39(2): 507 - 517. [ LIU Shengwei, GUO Dahai, CHEN Weitao, et al. The application of airborne LiDAR technology in landslide investigation and monitoring of Three Gorges Reservoir Area [ J ] . *Geology in China*, 2012, 39(2): 507 - 517. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 12 ] 康帅, 张景发, 崔效峰, 等. 基于高精度地基 LiDAR 技术的活动断层错断地貌研究——以冷龙岭活动断裂带为例 [ J ] . 地震, 2017, 37(3): 61 - 71. [ KANG Shuai, ZHANG Jingfa, CUI Xiaofeng, et al. Offset landform caused by active fault based on high precision terrestrial LiDAR data: A case study of the Lenglongling active fault zone [ J ] . *Earthquake*, 2017, 37(3): 61 - 71. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 13 ] 陈涛, 张培震, 刘静, 等. 机载激光雷达技术与海原断裂带的精细地貌定量化研究 [ J ] . 科学通报, 2014, 59(14): 1293 - 1304. [ CHEN Tao, ZHANG Peizhen, LIU Jing, et al. Quantitative study of tectonic geomorphology along Haiyuan fault based on airborne LiDAR [ J ] . *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(14): 1293 - 1304. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 14 ] 李显巨. 基于新型遥感数据的典型地质环境信息智能识别 [ D ] . 武汉: 中国地质大学, 2016. [ LI Xianju. Intelligent identification of typical geo-environmental information using new remote sensing data [ D ] . Wuhan: China University of Geosciences, 2016. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 15 ] 余金星, 程多祥, 刘飞, 等. 机载激光雷达技术在地质灾害调查中的应用——以四川九寨沟 7.0 级地震为例 [ J ] . 中国地震, 2018, 34(3): 435 - 444. [ SHE Jinxing, CHENG Duoxiang, LIU Fei, et al. Application of airborne LiDAR technology in geological disaster investigation: Taking the Jiuzhaigou  $M_s$ 7.0 earthquake in Sichuan Province as an example [ J ] . *Earthquake Research in China*, 2018, 34(3): 435 - 444. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 16 ] 董秀军, 许强, 余金星, 等. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探 [ J ] . 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 432 - 441. [ DONG Xiujun, XU Qiang, SHE Jinxing, et al. Preliminary study on interpretation of geological hazards in Jiuzhaigou based on multi-source remote sensing data [ J ] . *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 432 - 441. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 17 ] 罗达, 林杭生, 金钊, 等. 无人机数字摄影测量与激光雷达在地形地貌与地表覆盖研究中的应用及比较 [ J ] . 地球环境学报, 2019, 10(3): 213 - 226. [ LUO Da, LIN Hangsheng, JIN Zhao, et al. Applications of UAV digital aerial photogrammetry and LiDAR in geomorphology and land cover research [ J ] . *Journal of Earth Environment*, 2019, 10(3): 213 - 226. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 18 ] 曲雪妍, 李媛, 房浩, 等. 基于时空维度耦合的地质灾害发育程度评价研究 [ J ] . 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 137 - 145. [ QU Xueyan, LI Yuan, FANG Hao, et al. A study of the evaluation of geo-hazards development degree based on time-space coupling [ J ] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 137 - 145. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 19 ] 郑史芳, 黎治坤. 结合倾斜摄影技术的地质灾害监测 [ J ] . 测绘通报, 2018(8): 88 - 92. [ ZHENG Shifang, LI Zhikun. Geohazard monitoring based on tilt photography [ J ] . *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(8): 88 - 92. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 20 ] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议 [ J ] . 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949 - 956. [ GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: thoughts and recommendations [ J ] . *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949 - 956. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 21 ] 杨航, 辛宇佳, 李建华, 等. 广东莲花山花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义 [ J ] . 地球学报, 2022, 43(2): 211 - 223. [ YANG Hang, XIN Yujia, LI Jianhua, et al. Zircon U-Pb ages and geochemical constraints of the Lianhuashan granitoids in Guangdong Province and their geological implications [ J ] . *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, 43(2): 211 - 223. ( in Chinese with English abstract ) ]