



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

引用本文:

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.

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.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测](#)

Detection and Monitoring of Potential Landslides Along Minjiang River Valley in Maoxian County, Sichuan Using Radar Remote Sensing
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1529–1537 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210367>

[川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

[利用2016—2020年Sentinel-1数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1560–1568 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210247>

[顾及飞机姿态角的滩涂LiDAR强度数据修正法](#)

An Intensity Correction Method for Shoaly Land LiDAR in Consideration of the Attitude Angles of the Aircraft
武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1249–1257 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170261>

[环境因子空间特征约束的区域滑坡敏感性模糊逻辑分析方法](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1431–1440 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200653>



复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究

郭晨¹ 许强¹ 董秀军¹ 刘小莎¹ 余金星²

1 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

2 成都理工大学地球科学学院,四川 成都,610059

摘要:地质灾害识别是灾害易发性评价以及监测预警的基础,采用传统的人工地面调查和卫星遥感方式在地形条件复杂的高植被覆盖山区进行地质灾害识别具有较大困难。机载激光雷达技术(light detection and ranging, LiDAR)的发展为高植被复杂山区的地质灾害识别提供了新的解决方案。利用获取的机载LiDAR点云数据,通过点云滤波、空间插值生成了高分辨率数字高程模型(digital elevation model, DEM),结合天空视域因子(sky view factor, SVF)的DEM可视化方法,开展了中国四川省丹巴县城周边135 km²的地质灾害识别研究工作。共解译出地质灾害146处,总面积约46.48 km²,占研究区总面积的33.4%,并通过现场实地调查验证了机载LiDAR识别结果的可靠性。在此基础上分析了该区地质灾害的空间分布规律及其影响因素。研究结果为高植被复杂山区的地质灾害识别提供了一定参考,并为丹巴县地质灾害防治与风险评价提供数据支撑。

关键词:地质灾害识别;机载激光雷达;遥感解译;天空视域因子;复杂山区

中图分类号:P237

文献标志码:A

在遥感技术兴起之前,地质灾害识别主要依赖人工地面巡排查,对于一些山高路险、人力难至的区域难以有效开展工作,存在效率低下、调查人员人身安全不能得到有效保障等问题^[1]。随着遥感技术的不断发展,尤其是得益于遥感卫星不断增多,地面分辨率不断提高,历史存档遥感数据不断丰富,卫星光学遥感成为地质灾害识别最常用的方法之一^[2-3]。此外,合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)^[4-6]、无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)摄影测量技术^[7-8]也逐渐发展成为现今地质灾害识别的新方法。然而利用卫星影像、无人机影像在识别绘制降雨、地震或人类工程活动等诱发的一些光谱或纹理特征较为明显的滑坡等地质灾害非常有效^[9-10],InSAR在探测缓慢运动的滑坡方面有一定优势,但是以上遥感技术对于茂密植被覆盖下的滑坡识别显得尤为困难^[11]。近年来西南山区发生的多起大型突发性地质灾害^[12-13]越来越说明传统的地质灾害调查识别方法已不能完全满足西南高植被山区现今防灾减灾的需求。

相较于光学影像和其他遥感数据,机载LiDAR最大的优势在于可在一定程度上“穿透”植被获取高分辨率数字高程模型(digital elevation model, DEM)^[14-15],经验丰富的地质工作者根据滑坡等地质灾害展现出的各种地貌特征来进行识别解译^[16],因此机载LiDAR逐渐成为高植被地区滑坡识别最有效的方法之一。这项技术从2000年开始被意大利、奥地利、日本、新西兰等国家广泛应用于滑坡识别及编目、应急调查及风险评估^[17-18]。随着LiDAR技术的发展以及价格的不断降低,国家级的机载LiDAR数据进一步普及^[19-20],为高植被覆盖区域地质灾害的识别提供了巨大的资源,为各种地貌景观的演变提供了新的见解^[21-22]。而由于数据获取成本相对高昂、数据处理较为繁琐等原因,除了文献[23-25]在三峡、九寨沟等区域开展了小范围研究外(面积小于50 km²),在中国大陆开展大面积、区域性基于机载LiDAR的地质灾害识别研究工作还相对较少,尤其是在西部复杂山区。

本文以中国西南复杂山区滑坡频发的丹巴县城为研究示范区,以机载LiDAR获取的高分辨

收稿日期:2021-03-15

项目资助:国家自然科学基金(41941019);国家创新研究群体科学基金(41521002);国家重点研发计划(2018YFC1505202)。

第一作者:郭晨,博士生,主要从事地质灾害航空遥感早期识别研究。978808082@qq.com

通讯作者:许强,博士,教授。xq@cdut.edu.cn

DEM 为基础,结合基于天空视域因子(sky view factor, SVF)的地形可视化方法进行地质灾害的识别,并通过野外现场调查验证地质灾害识别结果的准确性,在此基础上分析地质灾害的发育及空间分布规律,为机载激光雷达技术(light detection and ranging, LiDAR)在类似区域进行地质灾害识别应用提供了一定参考和指导,也为区域地质灾害的调查防治、监测预警提供基础数据支持,进一步服务于城镇的规划建设。

1 研究区概况

研究区位于中国西南部,四川省甘孜州东北部丹巴县城周边,距四川省成都市约 400 km,总面积约 135 km²。研究区最低海拔约 1 840 m,最高海拔约 4 560 m,相对高差 2 720 m,为典型的侵蚀剥蚀高山峡谷地貌。出露的地层岩性主要为志留系茂县群第四岩组(Smx⁴)银灰色二云英片岩,表层覆盖第四系全新统崩坡积块石土(Q^{4col+dl})。区内主要有北东南西流向的小金河、南北流向的大金川河,二者在流经丹巴县城后汇聚成大渡河。研究区内降雨量分布不均,月降水量具明显双峰型,即 6 月为降雨高峰期,9 月为次高峰期。汛期日降雨量较大,约 12~35 mm^[26],属大暴雨,极易诱发地质灾害。

另外,由于丹巴县地处青藏高原滇缅印“歹”字型构造,川滇南北向构造与小金-金汤弧形构造和复合部位,地质历史时期漫长,构造体系复杂,地质环境脆弱,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发,属于四川省地质灾害高易发区。据四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院统计,截至 2019-03-20,研究区 135 km² 范围内发育地质灾害隐患高达 181 处(见图 1),约占全县地质灾害总数的 21%。随着人类活动日益增多,丹巴县内地质灾害发育呈加剧之势,多处滑坡变形复活,对当地居民生命财产安全构成了巨大威胁^[4]。如 2003 年的“6.26”及“7.11”泥石流灾害,分别造成了 50 人失踪、1 人死亡和 7 人失踪、10 人死亡的重大人员伤亡和严重的经济损失^[27];2005-02 县城建设街滑坡复活,危及丹巴半个县城的安全,国家和四川省政府高度重视,投入上千万元资金进行应急抢险和综合整治^[28-29]。丹巴县的地质灾害已严重制约了丹巴县国民经济发展,影响社会稳定繁荣。

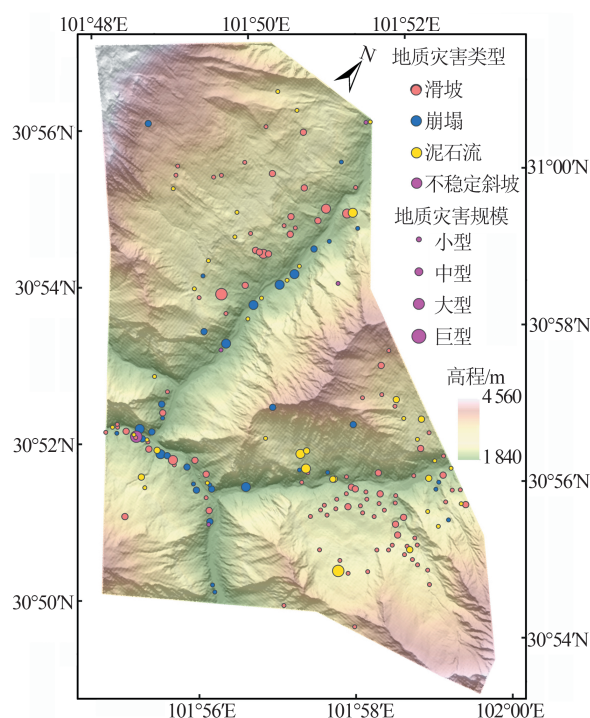


图 1 研究区入库地质灾害发育分布图

Fig.1 Geohazards Distribution Map of Study Area Based on Field Investigation

2 数据与方法

2.1 数据及处理流程

在本文研究中,机载 LiDAR 数据获取于 2019-02-13—2019-02-19,飞行平台采用 AS350 直升机,激光雷达平台采用绵阳天眼公司生产的 SKYEYE SE-J1200B 机载激光雷达系统,该系统适用于高山丘陵地区作业。激光发射器最大视场角为 50°,激光脉冲频率为 50~550 kHz。该激光雷达系统通过将激光扫描仪、定姿定位系统(position and orientation system, POS)、高分辨率数码相机、嵌入式计算机集成于一体,在航摄作业时和激光扫描仪同轴挂载了像素为 8 000 万的光学相机,可同步获取测区激光点云和航空照片。为保证数据的精度,在丹巴县城及周边区域布设 4 个地面控制点,航摄期间架设了 1 台 GPS 接收机用于同步观测。对地质灾害识别而言最有用的数据是地面点云,因此对获取到的激光点云数据首先要进行点云滤波和分类,确定地面点和非地面点。利用 TerraSolid 软件的 TerraScan 模块形成宏命令,采用渐进加密三角网滤波算法进行点云自动分类,再结合人工手动整饰在一定程度上剔除未去除干净的植被点,找回过度分类的地面点,实现点云的精细化分类

(见图2)。在点云分类完成后,使用ArcGIS 10.3将点云数据转化为数字表面模型(digital surface model, DSM)和DEM(见图2),分辨率为0.5 m。

此外,对机载LiDAR同轴获取的航空照片利用Pix4d Mapper 4.3.2软件生成了研究区正射影像图,分辨率为0.2 m,用于辅助滑坡识别解译。

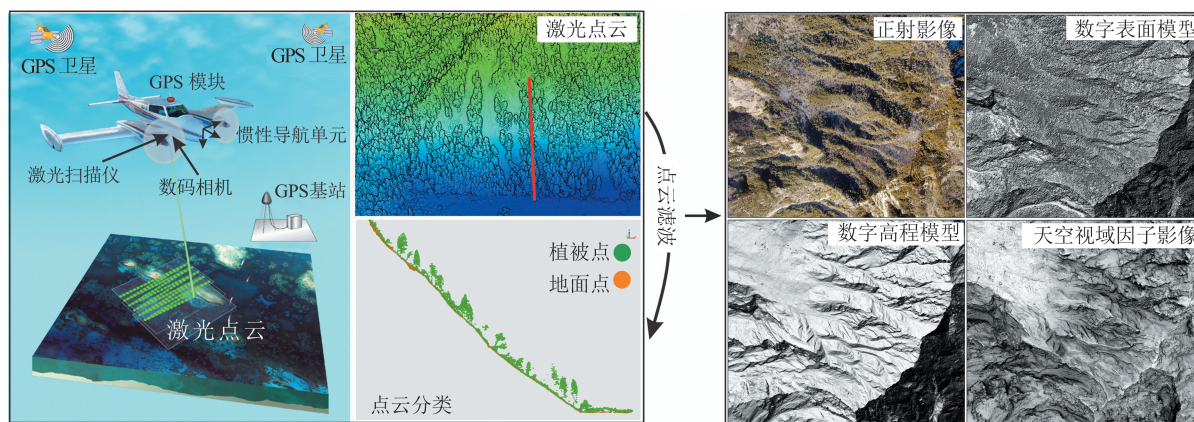


图2 机载LiDAR点云处理流程及产品

Fig. 2 LiDAR Data Processing and LiDAR Data Products

2.2 基于天空视域因子的DEM可视化方法

利用高分辨率或超高分辨率的DEM进行滑坡识别及编目时,首先要将DEM进行可视化,传统也是最流行的方法是将DEM生成山体阴影图,通过模拟太阳光照射地形引起的明暗变化来对地形图进行渲染,使二维地形看起来有三维立体的效果,但受到太阳方位角及高度角的影响,生成的阴影图往往差异较大,使得潜在滑坡的微小特征难以被有效发现,进而影响滑坡识别的准确性和可靠性。为了减轻单一光源对DEM可视化影像的影响,文献[30]提出了由坡度、地形正开度和地形负开度组成的红色地形图(red relief image map, RRIM),在考古界应用较多。另外一些研究者还尝试将DEM生成的坡度图、正开度图、SVF等用于DEM可视化分析。

图3对比了常规的几种DEM可视化方法,以目视解译的方法来评估滑坡特征的可辨识度,图3(a)为该区域的正射影像图。太阳方位角为45°时与斜坡坡向垂直,导致斜坡亮度过高没有阴影(见图3(b)),反之225°的太阳方位角与斜坡坡向一致,斜坡上阴影过重(见图3(c)),均无法真实反映滑坡的整体形态特征,在315°方位角下的滑坡特征相对最明显(见图3(d)),135°太阳方位角次之(见图3(e))。正开度图、坡度图和RRIM均不受光源角度影响,能在一定程度上反映滑坡的边界特征(见图3(f)~3(h)),但是相比较而言,SVF影像不仅能清晰展示滑坡整体边界,而且对于后缘陡坎/前缘堆积等微小地貌特征的展示都比前几种方法更清晰(见图3(i))。

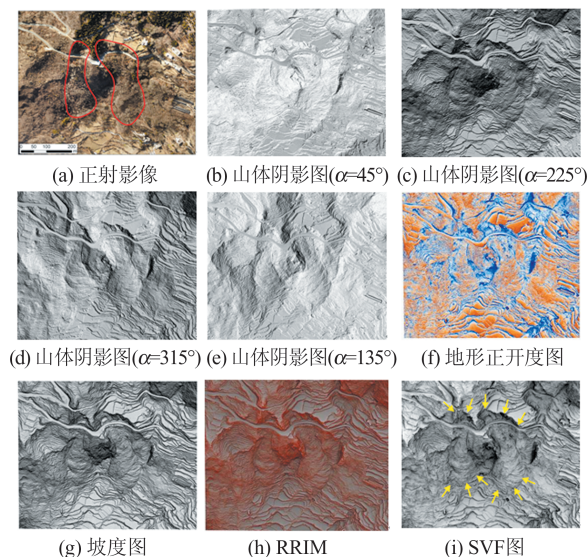


图3 不同DEM可视化方法对滑坡特征呈现的差异

Fig.3 Differences of DEM Visualization Methods on Showing Landslide Characteristics

SVF利用漫反射的方法有效解决了单一光源照射下的阴影问题,其含义是某一点处对天空的可见度,是对地表形态开阔度的定量描述,反映了视线范围内天空被遮挡的程度。计算SVF的最简单方法是测量它的立体角,如果在DEM上选取一个观测点,那么立体角 Ω 的定义为:以观测点为球心,构造一个单位球面,任意物体投影到该单位球面上的投影面积,即为该物体相对于该观测点的立体角。立体角是单位球面上的一块面积,它表示在某一点上可以包含的最大范围(以空间为单位观察者上方半球的投影面积):

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\varphi d\varphi d\lambda = 2\pi \quad (1)$$

式中, φ 、 λ 分别表示半球内的纬度和经度。由于天空可见度受地物的限制, 假设在水平面以上, 水平方向上的方位角具有相同的仰角, 则立体角为:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\varphi d\varphi d\lambda = 2\pi(1 - \sin\gamma) \quad (2)$$

式中, γ 表示相对于水平地表上的仰角。由于实际观测点在各个方向的地表高度不同, 因此仰角也不相同, 则可以通过在水平面上选的一定数量的方位角, 逐一计算其水平面垂直仰角 γ_i 来有效地计算立体角(见图 4):

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \int_{\gamma_i}^{\pi/2} \cos\varphi d\varphi = 2\pi(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sin\gamma_i}{n}) \quad (3)$$

式中, n 为搜索方向的数量; γ_i 为不同方向的高度角。则 SVF 的计算公式为:

$$SVF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sin\gamma_i}{n} \quad (4)$$

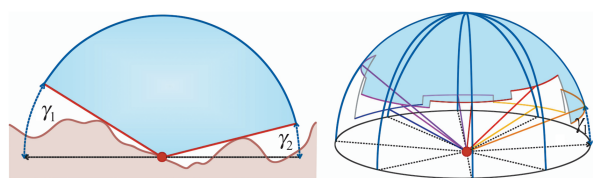


图 4 SVF 计算原理图

Fig.4 Calculation Principle of Sky View Factor

SVF 可以通过自动化地球科学分析系统(system for automated geoscientific analyses, SAGAGIS)^[31] 计算实现。该软件也可用于进一步分析和生产 DEM 衍生物, 如山体阴影图、坡度图、地形开度图等。

2.3 地质灾害识别方法

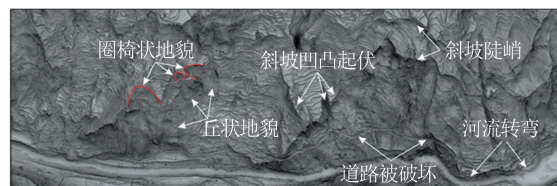
采用人工目视解译方法对研究区地质灾害进行解译。如图 5 所示, 通过观察 SVF 可视化影像上地质灾害的形态、阴影、纹理、色调等, 寻找地质灾害变形或运动过程中在地表上留下的各种地貌标志, 包括圈椅状地貌、陡坎、裂缝、堆积等直接标志, 以及破坏道路、堵塞河流而引起的道路、河流改道等间接标志(见图 5), 以此来进行灾害的识别解译。

3 地质灾害识别结果

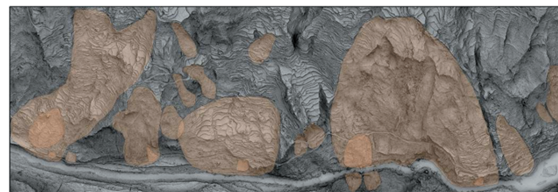
3.1 地质灾害类型及其特征

利用机载 LiDAR 数据结合 SVF 可视化影像, 在研究区 135 km² 范围内共识别和解译出地质灾害 146 处, 依据《T/CAGHP001-2018 地质灾

害分类分级标准》和各类灾害的特征, 将解译出的地质灾害分为滑坡 ($n=86$), 崩塌 ($n=45$) 和泥石流 ($n=15$), 结果如图 6 所示。



(a) 地质灾害地貌特征



(b) 根据地质灾害地貌特征的解译结果示例

图 5 地质灾害地貌特征及解译结果示例

Fig.5 Geohazard Morphological Characteristics in SVF Map and Interpreted Results for a Sample Area

解译出的地质灾害总面积约为 46.48 km², 占研究区总面积的 33.4%, 灾害发育面密度达 1.08 处/km²。在整个研究区识别出的最大面积和最小面积的地质灾害均为滑坡, 其面积差异较大, 滑坡最大面积约为 9.36 km², 最小面积约为 937 m²。

滑坡是研究区最常见的地质灾害, 占灾害总数的 58.90%。结合 LiDAR 影像、文献资料以及现场调查, 研究推测这类较大规模的滑坡一般是在地震的作用下形成的^[32], 年代较为久远, 如研究区聂噶乡和中路乡解译出的两个面积约 9×10^6 m² 的滑坡; 另外一些中小型的滑坡大多是在降雨、河流掏蚀及人类工程活动(如削坡建房、公路开挖等)影响下形成的, 多发育于较老滑坡堆积体上, 为老滑坡的局部堆积体复活。这类滑坡一般海拔较低, 沿河流及公路两侧的人类聚居区分布, 具有多级滑动的特点。研究区典型滑坡如图 7(a)所示。

崩塌占研究区灾害总数的 30.82%。崩塌多发生于公路及河流两侧较为陡峭的斜坡部位, 平均坡度约 40°~50°, 面积整体相对较小, 临空面较好。具有明显的物源区和堆积区, 物源区坡度较陡, 一般大于 60°, 结构面发育, 纹理较为粗糙; 堆积区一般呈倒锥形, 坡度较缓, 纹理相对平滑。如图 7(b)所示为研究区典型崩塌。

研究区泥石流数量较小, 占灾害总数的 10.27%, 泥石流整体较为狭长, 一般具有较大的

汇水面积,有完整的物源区、流通区和堆积区。物源区较明显,发育较多小型的崩塌滑坡等物

源;流通区较为狭长,流水冲刷侵蚀痕迹清晰,沟床坡降大;堆积区为明显的扇形(见图7(c))。

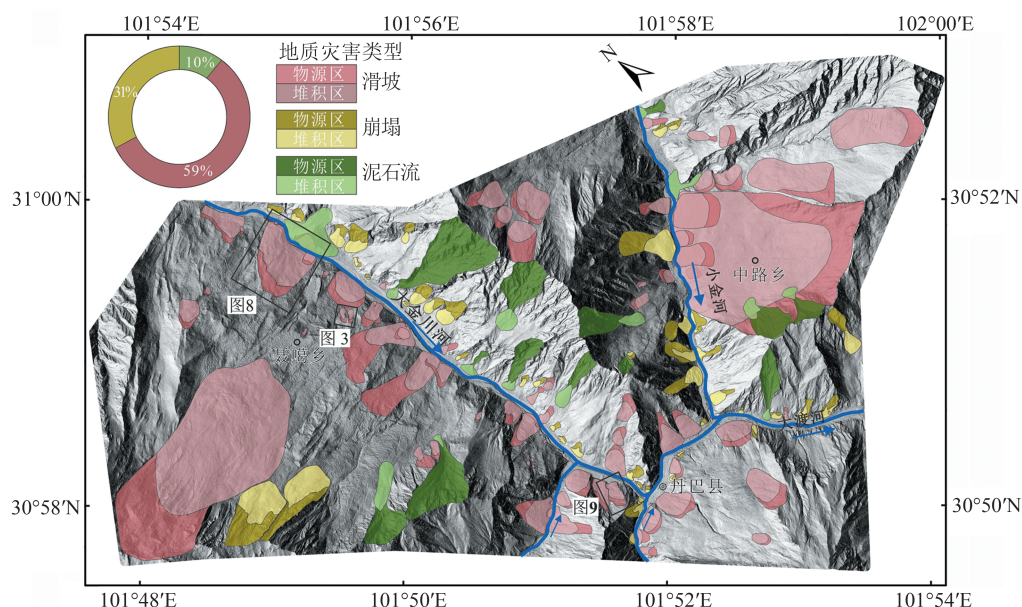


图6 研究区地质灾害机载LiDAR识别分布图

Fig.6 LiDAR Based Geohazard Inventory Map of the Study Area

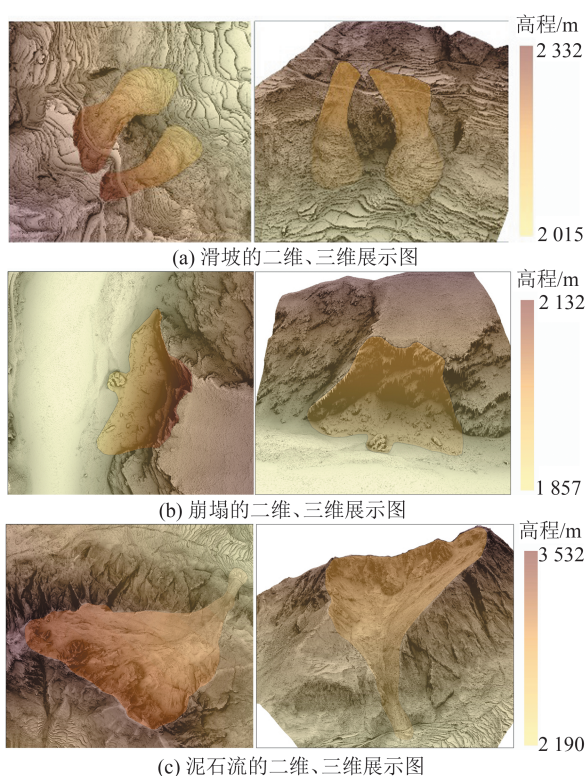


图7 滑坡、崩塌、泥石流的二维、三维展示图

Fig.7 Two- and Three-Dimensional Examples of Landslide, Rock Fall, Debris Flow

3.2 地质灾害识别结果的验证

为了验证机载LiDAR识别结果,对研究区识别出的地质灾害进行了野外调查复核,结果表明LiDAR影像上的地质灾害的地形特征与野外现

场证据十分吻合,基于机载LiDAR的地质灾害识别结果具有较高的准确性和可靠性。下文介绍小聂呷村滑坡L01和五里牌新区滑坡L02两个典型案例。

滑坡L01位于巴旺乡小聂呷村,前缘高程为1920 m,后缘高程为2470 m,整体高差约550 m,主滑方向约100°,整体坡度约24°。滑坡纵向长约1200 m,横向宽约1100 m,分布面积约1.01 km²。正射影像显示滑坡周围植被较发育(见图8(a)),SVF影像上显示该区域曾经发生过明显滑动迹象,且具有多级滑动特征,坡体上存在多级滑坡陡坎,次级滑动边界清晰可辨,坡体物质多为碎块石且较为杂乱(见图8(b)、8(c))。

根据现场调查判断该滑坡为一特大型土质滑坡,滑坡后缘存在明显下错变形迹象。据当地村民反映,斜坡后缘地表下错现象已出现十余年,平均每年下错3~5 cm,每逢雨季变形较为强烈,现场调查发现地表有较明显的新生裂缝(见图8(d)),宽约10 cm,延伸长0.5~3 m,走向近南北向。滑坡中后部坡表物质较为破碎,堆积较为杂乱,现场无人机拍摄的照片显示该位置处曾发生过明显垮塌(见图8(e)),有明显块石堆积,堆积物架空现象明显。滑坡前缘因公路、河流切坡临空条件较好,坡度较陡,因公路开挖形成较高陡的边坡,垂直高差达60 m,存在局部崩塌落石现象,前缘现已架设主动防护网(见图8(f))。

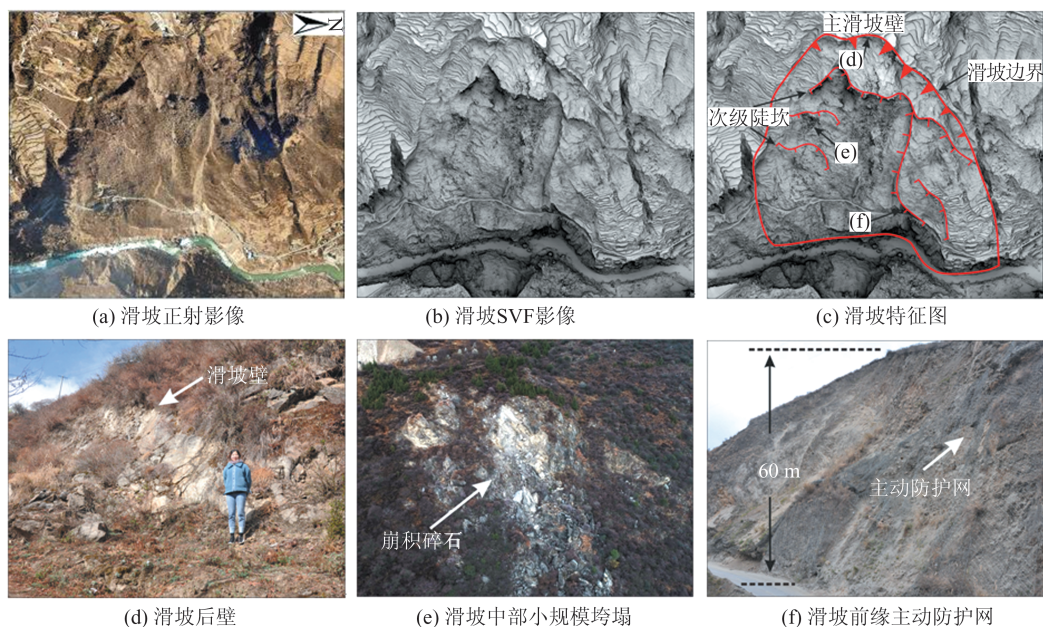


图 8 滑坡 L01 的 LiDAR 影像及现场复核照片

Fig. 8 LiDAR and Field Investigation Result of Landslide L01

L01 滑坡威胁前缘散列居民点、省道 211 以及大金川河。

滑坡 L02 位于章谷镇五里牌新区大金川河右岸(见图 9(a))。滑坡平面上整体呈长舌状,相较于山体阴影图(见图 9(b)),在 SVF 影像上滑坡的整体边界更为清晰(见图 9(c)、图 9(d))。滑坡主滑方向约 40° ,前缘高程 1 877 m,后缘高程 2 210 m,相对高差约 330 m。前缘地形较缓、后缘较陡,前后缘坡度分别约 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $50^\circ \sim 60^\circ$,整体平均坡度约 31° 。滑坡纵向长约 475 m,横向宽约 260 m,分布面积约 $12.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚度约 20 m,估算滑坡体积约为 $240 \times 10^4 \text{ m}^3$,为一大型土质滑坡。滑坡区表层覆盖物以块石土为主,块石大小不一,整体厚度较大,滑坡后部块石呈似基岩状,中前部块石土松散至稍密。

由于近几年丹巴城镇建设的快速发展,2013 年五里牌新区开始建设,开挖坡脚修建房屋造成前缘临空坡体稳定性降低,滑坡前部产生局部滑动(见图 9(e)),导致滑坡整体发生明显滑动。为阻止滑坡的进一步滑动,滑坡前缘修筑了挡墙阻滑,但近年来受雨季强降雨影响,前缘挡墙体出现鼓胀开裂、错位现象(见图 9(f)),现场调查时,根据无人机航拍影像显示,滑坡后缘还存在尚未完全解体的破碎岩体(见图 9(g)、9(h)),在地震或极端气候条件下可能沿斜坡向下滚落。滑坡威胁下方数栋住宅小区、公寓、酒店公路等以及数千人的生命财产安全。

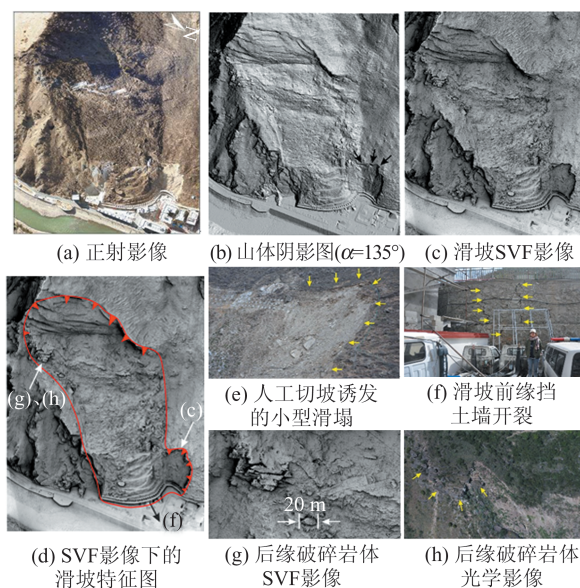


图 9 滑坡 L02 的 LiDAR 影像及现场复核照片

Fig. 9 LiDAR and Field Investigation Result of Landslide L02

4 地质灾害空间分布规律及其影响因素

核密度分析可以帮助人们分析滑坡的空间分布特征^[33]。图 10(a)所示为利用 ArcGIS 10.3 软件制作的研究区滑坡分布核密度图,从图 10(a)中可以看出研究区滑坡主要沿河流及道路两侧呈线性分布,这与研究区地形极其陡峭有关,人们的生产生活主要集中于相对平缓的河谷两岸的低海拔地区,因此密集的人类活动诱发了大量

滑坡。另外,除了沿河流线性分布以外,从图10(a)中可以看出研究区滑坡还集中分布于聂噶乡、甲居藏寨游客中心和丹巴县城-五里牌新区。研究区滑坡主要分布在这3个区域的主要原因为:

1)图10(a)最右侧的丹巴县城-五里牌区域(Part1)。因受地形条件的制约(见图10(b)),丹巴县的工程建设及城镇的扩展不得不开挖坡脚进行场地建设,一方面引起坡脚应力松弛,另一方面增加斜坡前缘有效临空面,导致斜坡局部失稳破坏从而引起古滑坡复活(见图10(c))。例如,2005年坡脚开挖建房导致丹巴县城滑坡复活^[29],危及大半个县城,后来县城不断向北发展至五里牌新区,由于继续大面积开挖坡脚修建酒店、医院等基础设施,由此又诱发了大量滑坡,如五里牌新区滑坡。

2)图10(a)中间部位的甲居藏寨游客中心

(Part2),由于该区域坡体物质为松散的土石混杂堆积物(见图10(d)),这类岩土混合物结构无序、层次多,物质组分为粉砂质粘土、碎块石土等(见图10(e)),堆积物结构松散,力学强度低,稳定性差,在地下水等外动力作用下容易产生变形破坏。加上景区游客中心以及公路的建设不可避免地诱发了大量滑坡(见图10(f)、10(g))。

3)图10(a)中最左侧的聂噶乡区域(Part3),大金川河从坡体前缘流过,该段河道狭窄,洪水季节水位陡涨陡落,据当地村民反映,该区域洪水季节水位变幅达5~12 m,由于坡体物质为大型古滑坡堆积体,受河流强烈侵蚀而具有较好的临空面,因而在河流常年掏蚀以及一定的公路切坡作用下,靠近河流的斜坡向临空方向蠕滑,诱发了大量小规模滑坡。图10(h)所示为被洪水冲毁的防洪坝。

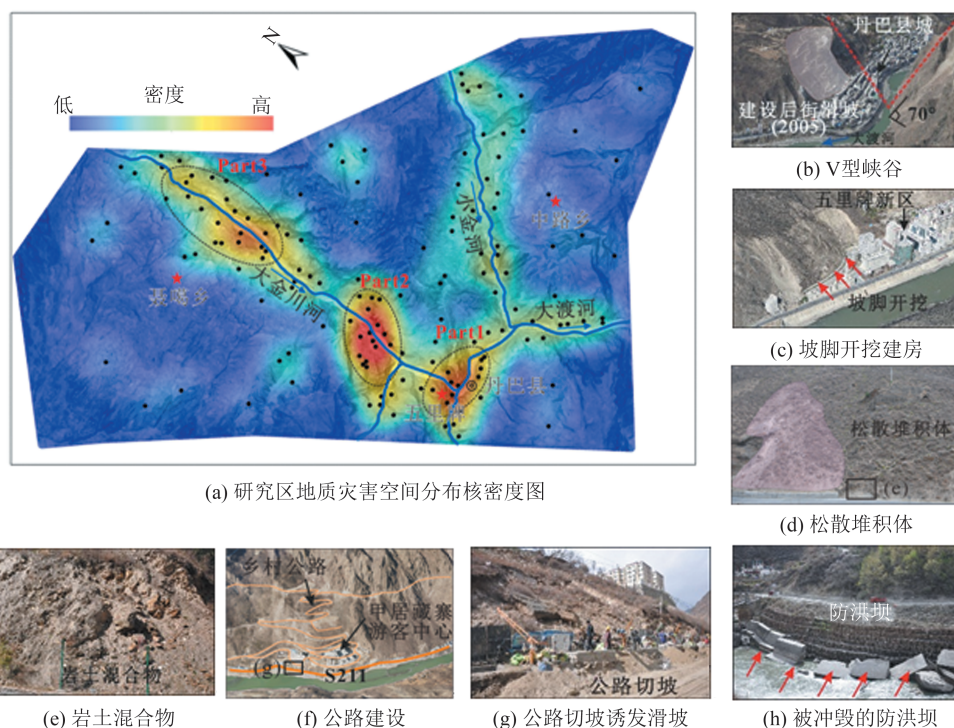


图10 研究区地质灾害空间分布核密度图及其影响因素

Fig.10 Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Geohazards in the Study Area

5 结语

为研究机载LiDAR技术在高植被复杂山区的地质灾害识别能力,本文利用获取的丹巴县城及周边135 km²的机载LiDAR数据,结合基于SVF的DEM可视化方法开展了该区地质灾害识别解译工作,建立了区域地质灾害数据库,并结合现场调查验证了识别结果的可靠性。机载Li-

DAR用于高植被复杂山区地质灾害识别具备较强的可行性和有效性,这为机载LiDAR技术的地质灾害的大范围识别应用提供了一定参考和借鉴。

1)受地形因素的制约以及人类工程活动影响,研究区地质灾害频发。基于机载LiDAR数据,在整个研究区共识别了146处地质灾害,灾害面积占研究区总面积的1/3;结合核密度分析滑

坡的空间分布特征以及现场调查表明,研究区主要沿河流及道路两侧呈线性分布,且受公路开挖、切坡建房等不当的人类工程活动影响极为严重,丹巴县在城市扩张过程中不合理的人类工程活动诱发了大量滑坡、崩塌等地质灾害,造成了严重的经济损失。

2)多种因素共同作用下,机载 LiDAR 在本文研究区识别小型地质灾害的能力有限。从地质灾害识别结果来看,通过 0.5 m 分辨率 DEM 能识别的最小滑坡的面积约为 900 m²,对于更小规模的地质灾害未能有效识别。这说明机载 LiDAR 技术识别小型地质灾害具有一定困难,尤其是投影面积较小的崩塌。一方面这可能与研究区侵蚀剥蚀高山峡谷地貌以及大多数斜坡受强烈的人为改造影响有关,小型的滑坡崩塌等地质灾害的地面特征变得不明显;另一方面可能与地面点云密度和 DEM 分辨率有关,可通过提高数据分辨率对小规模灾害进行有效识别。另外,利用机载 LiDAR 识别地质灾害规模的大小还与解译人员的水平、地貌特征、灾害类型、植被覆盖率、灾害前后缘高差等多种因素存在关系。

3)融合多种技术手段是破解地质灾害隐患识别难题的方向。机载 LiDAR 能识别的地质灾害及隐患主要为历史上曾发生过明显变形迹象以及失稳破坏的斜坡,但是对于正在变形的灾害隐患通过单期数据则难以识别,因此充分利用现代遥感技术,将高分辨率光学遥感、InSAR、LiDAR 等现代遥感技术有机结合,发挥各自优势,并结合现场地质调查,能够最大限度地识别出地质灾害隐患,有效破解地质灾害隐患识别难题。

参 考 文 献

- [1] Santangelo M, Cardinali M, Rossi M, et al. Remote Landslide Mapping Using a Laser Rangefinder Binocular and GPS[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(12): 2 539-2 546
- [2] Nichol J, Wong M S. Detection and Interpretation of Landslides Using Satellite Images[J]. *Land Degradation and Development*, 2005, 16(3): 243-255
- [3] Li Weile, Xu Qiang, Lu Huiyan, et al. Tracking the Deformation History of Large-Scale Rocky Landslides and Its Enlightenment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1 043-1 053 (李为乐, 许强, 陆会燕, 等. 大型岩质滑坡变形历史回溯及其启示[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 1 043-1 053)
- [4] Dong J, Zhang L, Tang M, et al. Mapping Landslide Surface Displacements with Time Series SAR Interferometry by Combining Persistent and Distributed Scatterers: A Case Study of Jiayu Landslide in Danba, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 180-198
- [5] Schlögel R, Doubre C, Malet J P, et al. Landslide Deformation Monitoring with ALOS/PALSAR Imagery: A D-InSAR Geomorphological Interpretation Method[J]. *Geomorphology*, 2015, 231: 314-330
- [6] Intrieri E, Raspini F, Fumagalli A, et al. The Maoxian Landslide as Seen from Space: Detecting Precursors of Failure with Sentinel-1 Data[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 123-133
- [7] Gorum T, Fan X, van Westen C J, et al. Distribution Pattern of Earthquake-Induced Landslides Triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Geomorphology*, 2011, 133(3/4): 152-167
- [8] Rossi G, Tanteri L, Tofani V, et al. Multitemporal UAV Surveys for Landslide Mapping and Characterization[J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 1 045-1 052
- [9] Fiorucci F, Cardinali M, Carlà R, et al. Seasonal Landslide Mapping and Estimation of Landslide Mobilization Rates Using Aerial and Satellite Images[J]. *Geomorphology*, 2011, 129(1): 59-70
- [10] Yamazaki F, Kubo K, Tanabe R, et al. Damage Assessment and 3D Modeling by UAV Flights After the 2016 Kumamoto, Japan Earthquake[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Fort Worth, USA, 2017
- [11] Tomás R, Li Z. Earth Observations for Geohazards: Present and Future Challenges[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 194
- [12] Fan X, Xu Q, Alonso-Rodriguez A, et al. Successive Landsliding and Damming of the Jinsha River in Eastern Tibet, China: Prime Investigation, Early Warning, and Emergency Response[J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 1 003-1 020
- [13] Fan X, Xu Q, Scaringi G, et al. Failure Mechanism and Kinematics of the Deadly June 24th 2017 Xinmo Landslide, Maoxian, Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2017, 14(6): 2 129-2 146
- [14] Roering J J, Mackey B H, Marshall J A, et al. "You Are HERE": Connecting the Dots with Airborne LiDAR for Geomorphic Fieldwork[J]. *Geomorphology*, 2013, 200: 172-183
- [15] McKean J, Roering J. Objective Landslide Detection and Surface Morphology Mapping Using High-Resolution Airborne Laser Altimetry[J]. *Geomorphology*, 2004, 57(3/4): 331-351
- [16] Guzzetti F, Mondini A C, Cardinali M, et al. Land-

- slide Inventory Maps: New Tools for an Old Problem [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 112(1/2): 42-66
- [17] Chigira M, Duan F, Yagi H, et al. Using an Airborne Laser Scanner for the Identification of Shallow Landslides and Susceptibility Assessment in an Area of Ignimbrite Overlain by Permeable Pyroclastics [J]. *Landslides*, 2004, 1(3): 203-209
- [18] Comert R, Avdan U, Gorum T, et al. Mapping of Shallow Landslides with Object-Based Image Analysis from Unmanned Aerial Vehicle Data [J]. *Engineering Geology*, 2019, 260(July): 105264
- [19] Chen R F, Chang K J, Angelier J, et al. Topographical Changes Revealed by High-Resolution Airborne LiDAR Data: The 1999 Tsaoling Landslide Induced by the Chi-Chi Earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3/4): 160-172
- [20] Ardizzone F, Cardinali M, Galli M, et al. Identification and Mapping of Recent Rainfall-Induced Landslides Using Elevation Data Collected by Airborne Lidar [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2007, 7(6): 637-650
- [21] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, et al. Use of LiDAR in Landslide Investigations: A Review [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 5-28
- [22] Bell R, Petschko H, Röhrs M, et al. Assessment of Landslide Age, Landslide Persistence and Human Impact Using Airborne Laser Scanning Digital Terrain Models [J]. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 2012, 94(1): 135-156
- [23] Li X, Cheng X, Chen W, et al. Identification of Forested Landslides Using LiDAR Data, Object-Based Image Analysis, and Machine Learning Algorithms [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 9 705-9 726
- [24] 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 (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)
- [25] Wang Xuan, Fan Xuanmei, Yang Fan, et al. Remote Sensing Interpretation Method of Geological Hazards in Lush Mountainous Area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1 771-1 781 (王绚, 范宣梅, 杨帆, 等. 植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1 771-1 781)
- [26] Li Minghui, Zheng Wanmo, Shi Shengwei, et al. The Revival Mechanism and Stability Analysis to Jiayu Landslide of Danba County in Sichuan Province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(5): 577-582 (李明辉, 郑万模, 石胜伟, 等. 丹巴县甲居滑坡复活机制及其稳定性分析 [J]. 山地学报, 2008, 26(5): 577-582)
- [27] Chen N S, Li T C, Gao Y C. A Great Disastrous Debris Flow on 11 July 2003 in Shuikazi Valley, Danba County, Western Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2005, 2(1): 71-74
- [28] Fan Xuanmei, Xu Qiang, Huang Runqiu, et al. Dynamical Optimal Anchoring Design and Information Construction of Danba Landslide [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S2): 4 139-4 146 (范宣梅, 许强, 黄润秋, 等. 丹巴县城后山滑坡锚固动态优化设计和信息化施工 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4 139-4 146)
- [29] Huang R. Some Catastrophic Landslides Since the Twentieth Century in the Southwest of China [J]. *Landslides*, 2009, 6(1): 69-81
- [30] Chiba T, Kaneta S, Suzuki Y. Red Relief Image Map: New Visualization Method for Three Dimensional Data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B2): 1 071-1 076
- [31] Conrad O, Bechtel B, Bock M, et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(7): 1 991-2 007
- [32] Yan Changgen, Qi Shengwen, Wu Faquan, et al. Investigation of the Formation of Huge Quaternary Deposition Dadu River Near Houziyan Hydropower Dam [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 159-164 (晏长根, 祁生文, 伍法权, 等. 大渡河猴子岩水电站库尾段藏碉群斜坡巨型堆积体的成因分析 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 159-164)
- [33] Görüm T. Landslide Recognition and Mapping in a Mixed Forest Environment from Airborne LiDAR Data [J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105-155

Geohazard Recognition by Airborne LiDAR Technology in Complex Mountain Areas

GUO Chen¹ XU Qiang¹ DONG Xiujun¹ LIU Xiaosha¹ SHE Jinxing²

1 State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Objectives: Geohazard recognition and inventory mapping are the basis for geohazard susceptibility mapping, monitoring and early warning. However, it has been challenging to implement geohazard recognition and inventory mapping in mountainous areas with complex topography and vegetation cover through manual field survey or satellite remote sensing. Progress in the light detection and ranging (LiDAR) technology provides a new possibility for geohazard recognition in such areas. **Methods:** A high-resolution digital elevation model (DEM) was generated through the LiDAR point filtering and spatial interpolation, and combined with the DEM visualization method of sky view factor (SVF). Subsequently, the geohazard recognition work of Danba County and its surrounding area with a total area of 135 km² was carried out. **Results:** A total of 146 geohazards are remotely mapped and classified as slides, rock fall, debris flows based on morphologic characteristics, it shows nearly one-third of the study area is dominated by geohazards. Field validation indicates the success rate of LiDAR-derived DEM in recognition and mapping landslides with higher precision and accuracy. On the basis of this, the spatial distribution characteristics and influencing factors of the geohazards were analyzed and it indicates these mapped geohazards lie along both sides of the river, and their spatial distributions are related highly to human engineering activities, such as road excavation and slope cutting. **Conclusions:** The research results provide references for geohazard recognition and mapping in mountainous areas with complex topography and vegetation cover and provide data support for the geohazard prevention and risk assessment for Danba county.

Key words: geohazard recognition; airborne LiDAR; remote sensing interpretation; sky view factor; complex mountain areas

First author: GUO Chen, PhD candidate, specializes in landslide early recognition by airborne remote sensing. E-mail: 978808082@qq.com

Corresponding author: XU Qiang, PhD, professor. E-mail: xq@cdut.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41941019); National Innovation Research Group Science Fund (41521002); National Key Research and Development Program of China (2018YFC1505202).

引文格式: 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. 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)