

多源遥感技术在藏东南艰险复杂山区泥石流物源识别中的应用

苗晓岐

MIAO Xiaoqi

轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院),陕西 西安 710043

State key Laboratory of Rail Transit Engineering Information(FSDI), Xi'an 710043, Shaanxi, China

摘要:西藏南部及东南部地区地形地质条件复杂,气候恶劣,交通条件极其困难,铁路、公路等长大线状工程涉及范围非常广,采用常规的勘察方法进行泥石流等地质灾害勘察,由于效率低、风险大而无法完全查明。对线状工程在不同设计阶段采用卫星遥感、常规航空遥感、高分辨率无人机机载激光雷达(LiDAR)及高精度倾斜摄影技术,在藏东南高海拔、大高差等复杂艰险山区泥石流物源识别技术的应用进行研究。可行性研究阶段卫星遥感因其覆盖范围广而优势明显,初步设计阶段航空遥感可满足精度更高的要求,对于高植被覆盖地区,无人机机载LiDAR可去除植被得到地表真实高程模型,对泥石流物源进行有效识别,应用倾斜摄影技术可得到高分辨率三维立体影像,对强震后危岩进行判定,给震裂物源识别提供有效手段。形成了“卫星-常规航空-高精度无人机搭载”等从宏观-细观-细部的多源、立体、综合勘察方法,可为类似地区的泥石流物源识别提供借鉴。

关键词:多源遥感技术;藏东南;复杂艰险;泥石流;物源;识别

中图分类号:P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2052-09

Miao X Q. Application of multi-source remote sensing technology in the identification of debris flow source within complex mountainous areas in southeast Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2052-2060

Abstract: The terrain and geological conditions of southern and southeastern Tibet are complex, the climate is harsh, and the traffic conditions are extremely difficult. The long linear projects such as railways and highways involve a very wide range. Conventional survey methods are used for the survey of geological disasters such as mudslides due to low efficiency and high risks. It cannot be fully ascertained. This article uses satellite remote sensing, conventional aerial remote sensing, high-resolution drone airborne lidar (LiDAR) and high-precision oblique photography technology in the linear engineering at different design stages in the complex and dangerous mountainous areas such as high altitudes and large elevation differences in southeastern Tibet. Research on the application of provenance identification technology. In the feasibility study stage, satellite remote sensing has obvious advantages due to its wide coverage. In the preliminary design stage, aerial remote sensing can meet the higher accuracy requirements. For areas with high vegetation coverage, UAV airborne LiDAR can remove vegetation to obtain a true elevation model of the ground. The provenance is effectively identified, and high resolution three-dimensional images can be obtained by the application of oblique photography technology, which can determine the dangerous rock after a strong earthquake, and provide an effective means for the identification of the seismic source. The formation of "satellite-conventional aviation-high-precision drones" and other multi-source, three-

收稿日期:2021-05-24;修订日期:2021-08-10

资助项目:科技部国家重点研发计划《强震区特大型泥石流防控标准化体系及应用示范》(编号:2018YFC1505406)、西藏自治区科技厅重点研发计划项目(编号:XZ202001ZY0011G)、陕西省科技厅科技计划项目(编号:2020JQ-999)、中国铁建股份有限公司科研计划(编号:2019-B14)和中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(编号:(CZ)19-05、(CZ)19-08)

作者简介:苗晓岐(1971-),男,教授级高工,从事铁路工程地质勘察设计、科研与技术管理工作。E-mail:438962250@qq.com

dimensional, comprehensive survey methods from macro-micro-details, can provide reference for the identification of debris flow provenance in similar areas.

Key words: multi-source remote sensing technology; southeast Tibet; complicated and dangerous; debris flow; material source; recognition

青藏高原南缘及东南缘因印度板块向欧亚板块的强烈俯冲,新构造运动活跃,地震活动强烈,地质条件复杂、多变。该区属高山峡谷区,平均海拔大多在 4000 m 以上,大多高差在 1000 m 以上,受印度洋海洋性西南季风影响,降雨丰富,植被覆盖率高,局部可达 70% 以上。活跃的地质构造运动、频繁强烈的地震作用、破碎的岩体、高海拔及大落差、丰富的降雨,导致该区泥石流灾害频发,其规模和复杂性均属罕见,具有类型多、规模大、分布广、破坏力强、发生频率高、治理难度大等特点。该地区早期的地质灾害调查及研究多集中在 G318 国道等高等级交通要道附近及人口较多的城镇等地区,以及少数突发性的特大型滑坡、泥石流等灾害方面,完整的、系统性的地质灾害研究较少,专门的泥石流研究较薄弱。

泥石流的物源是泥石流发生的基本条件之一,也是预测某一沟域泥石流发展趋势的主要依据,因此对物源的调查非常重要。藏东南地区因地形陡峻、高寒缺氧,地质勘察人员无法到达,加之极端气候频发,交通极其困难,已有地质及地形、影像、气象等地理信息数据资料缺乏,快速准确获取地质灾害信息的技术途径少、精度差,在很大程度上增加了对泥石流等地质灾害体早期识别和评估的难度。传统的勘察方法无法或很难查明高海拔、大高差复杂艰险山区隐蔽性强的崩滑流及沟道覆盖层等泥石流物源。

铁路、公路等线状工程一般长达数百千米,甚至上千千米,在可研阶段需要进行大范围的地质选线,须对线路可能经过的地区进行大范围泥石流等地质灾害的普查。卫星遥感数据由于覆盖面广,且有多时段、多类型的特征,在可研阶段对泥石流等不良地质体的判释及解译,优选地质条件较好的交通廊道等具有重要作用,同时卫星遥感技术可应用于区域性长大断裂判释及活动速率的确定,如王阎昭等^[1]应用卫星 GPS 技术反演计算活动断裂的活动速率。初步设计阶段的工程设置对勘察的精度要求更高,卫星遥感数据精度显得不足。刘桂

卫^[2-3]等多源遥感技术在铁路勘察领域的应用进行了总结。

航空遥感按飞行平台可分为有人驾驶常规航空遥感、高精度无人机航空遥感平台 2 类。常规航空遥感适用于较大范围内的航空遥感影像获取,具有一次性获取的数据量大、数据质量高、面积大、精度相对卫星遥感高等优点。程三友等^[4]和王东明等^[5]对高分辨率遥感图像几何校正高山峡谷区地质填图中的应用进行了研究;孟祥连等^[6]应用航空摄影数据研究了真实感场景技术,协助工程地质技术人员进行铁路工程勘察,效果显著;无人机遥感可低空、低速安全飞行获取高分辨率(厘米级)的遥感影像,实现高精度三维测量,同时航迹可控,可获得特定工程的多面体影像,具有灵活、机动、便携等特点。有学者对激光雷达(LiDAR)在地学中的应用、无人机倾斜摄影及自动三维建模技术在地质灾害应急测绘中的应用、数字近景摄影测量快速获取岩体裂隙信息的工程应用进行了卓有成效的探索^[7-9]。显然,以无人机为平台的高精度遥感技术(激光雷达、倾斜摄影等)适合执行高海拔、大高差复杂艰险山区的泥石流物源识别任务,成为了卫星遥感和有人机航空遥感的有效补充。苗晓岐等^[10]系统研究了多源遥感技术的特点,在中尼铁路泥石流勘察中进行了广泛应用。本文系统研究了多源遥感技术手段的特点,总结形成“卫星遥感—常规航空遥感—高精度无人机搭载航空遥感”等从宏观—细观—细部的多源、立体、综合勘察方法,为类似地区泥石流物源识别提供有益借鉴。

1 藏东南艰险复杂山区泥石流类型

青藏高原东南缘及南缘泥石流非常发育,整体表现为分布集中、爆发频繁、规模巨大等特点,泥石流主要分布在大江、大河区域,大量出现在金沙江、澜沧江、怒江、帕龙藏布、吉隆藏布、陈塘沟、樟木沟(波曲)^[11]、亚东沟及其支流的两侧,在帕隆藏布尤其发育。按照形成泥石流的水动力条件,研究区泥石流可分为雨洪型、冰川型和冰川-雨洪型。雨洪

泥石流主要分布在非冰川作用区内的中小流域内,分布广泛,具有数量多、爆发频率高、危害性大的特点。冰川泥石流主要分布于然乌—林芝区段,该区为中国海洋性冰川的主要分布区,也是中国冰川泥石流的主要集中分布区。由于降水丰富,气温较高,冰川积雪消融强,运动速度大,加之有利的地质地形条件,促使大量的冰雪融水与高陡不稳定的松散固体物质遭遇形成冰川泥石流。据统计,帕隆藏布两岸的冰川泥石流沟总数可达180多条。冰川泥石流的一种特殊表现形式是冰湖溃决泥石流,主要分布在然乌—墨竹工卡有现代冰川和冰湖分布的沟谷内,在喜马拉雅山脉南坡的朋曲、吉隆藏布、陈塘沟、樟木沟、亚东沟也有分布。冰川—雨洪泥石流主要分布于然乌—米拉山之间,喜马拉雅山脉南坡,普遍发育冰川—雨洪泥石流。上游的冰雪融水与中下游暴雨径流叠加均会产生特大的混合型泥石流。

泥石流的物源一般包括崩滑流堆积物、岩石风化层、冰川运动产生的冰积物及强震后基岩斜坡表面的松动层。遥感解译首先以收集的地质及地灾资料作为解译的先验知识,初步总结遥感图像信息特征,建立准确的解译标志。

2 卫星遥感技术在泥石流物源解译中的应用

铁路、公路对泥石流勘察的主要任务是对泥石流的现状及发展趋势开展工作,绕避特大泥石流,以选择地质条件最优的交通廊道,即开展对泥石流的“识别”及“预测”,以评价泥石流对工程的影响。卫星遥感解译感测范围大,能准确获取大范围的数据资料,具有综合、宏观的特点;信息量大,具有多方位和全天候的特点;获得信息快,更新周期短,能快速地取得数据资料;具有较强的超脱性、抗干扰性等优点。

2.1 卫星遥感数据

目前满足泥石流及物源遥感识别的卫星主要有中国的高分2号卫星、美国WorldView 2卫星、陆地卫星(如Landsat-8)等,集成Quickbird等高分辨率影像的Google Earth在泥石流物源分析中也有重要作用。美国WorldView 2卫星能提供立体像对(分辨率为0.5 m),对其图像的处理主要是对各幅影像进行RPC(有理函数模型)纠正、投影变换及立

体恢复,其中最主要的是恢复三维立体解译环境,获取图像的光谱特征、纹理特征及几何特征^[12]。高分二号遥感影像具有色调对比度明显,影像分辨率和解译力均较好的特点,适宜直接用于遥感泥石流流域、沟道堆积物物源及泥石流堆积扇解译。对冰川、冰湖、植被、裸地等源地的信息解译,采用30 m分辨率的OLI遥感影像。

2.2 泥石流的解译

西藏南部及藏东南地区泥石流大多以冰川型泥石流为主,冰川信息的提取主要根据地物的光谱特征差异,利用冰雪在可见光波段的高反射率,通过图像增强,扩大冰雪与其他地物的光谱信息差异提取冰川信息^[12],然后逐一多次试验并对比分析提取源地信息。在特定的软件环境下佩戴立体眼镜,利用立体像对解译泥石流的物源,解译成果准确、清晰和直观。四川成都至西藏波密的交通廊道内,共解译出冰川泥石流328处,主要分布于活动断裂带发育的高山峡谷区。冰川泥石流分布集中、爆发频繁、规模巨大,主要出现在怒江、冻错曲、帕龙藏布、波堆藏布、亚龙藏布等地及其两侧支沟(图1)。其中,对公路、铁路等工程设施有较大影响的冰川泥石流56处,包括巨型冰川泥石流35处,大型冰川泥石流19处,中型冰川泥石流1处,小型冰川泥石流1处。解译出沟谷泥石流252处,集中分布于高山峡谷区。爆发频繁、规模巨大的沟谷泥石流主要出现在怒江峡谷两岸、然乌湖—冷曲、鲁朗河等河谷及其两侧支沟(图2)。其中,对铁路、公路有较大影响的沟谷泥石流31处(20处巨型、10处大型、1处中型)。

3 航空摄影遥感技术在泥石流物源解译中的应用

航空遥感既适用于大面积带状泥石流遥感解译,也适用于小面积范围内泥石流的各类物源识别,因此航空遥感技术在地质灾害调查工作中具有较大的优势,与卫星影像相比,航空遥感分辨率高、影像的数据质量较好,获取更方便和快速。航空遥感平台(直升机、无人机)可搭载DMC全数字航摄影仪、三维激光雷达(LIDAR)、机载合成孔径雷达(INSAR)、机载成像光谱仪等。

3.1 常规航空遥感

常规航空遥感以有人驾驶的飞机为搭载平台,



图 1 古乡冰川泥石流遥感影像

Fig. 1 Remote sensing image of glacial debris flow in Guxiang



图 3 航空遥感泥石流纹理及几何影像

Fig. 3 Aerial remote sensing of debris flow texture and geometric feature images



图 2 冻错曲沟谷泥石流流通区及堆积区遥感影像

Fig. 2 Remote sensing image map of debris flow circulation area and accumulation area in Dongcuoqu

数据的处理流程主要包括:航片外业控制测量-影像匀色-内业空三加密-DEM(数字高程模型)数据获取-正射纠正-影像镶嵌生成 DOM(数字正射影像)。

根据航空遥感图像所获取的色调特征(光谱特征)、纹理特征及几何特征(形状),与所建立的泥石流遥感解译标志进行对比。如图 3 所示,可以清楚地分辨出泥石流的形态:图 3 中浅色的为几个典型的泥石流;上部形成区平面呈瓢形,山坡陡峻,可清楚地看到冰川及碎屑物;流通区沟床短直狭窄,纵坡稍缓;堆积区位于沟谷出口,纵坡平缓,为扇形洪积物堆积,其上可见固定沟槽或漫流状沟槽(刀切状纹理);在图像的左侧可见坡面泥石流,而其物源为风化后的岩石碎屑及崩积物^[13]。

常规航空遥感的地质解译软件已比较成熟,与传统的遥感解译方法(利用立体镜)相比,优势主要体现在立体效果逼真、解译过程方便、易于控制、解

译尺度灵活、放大缩小自由操作,可实时加载到立体环境中,便于解译工作的进行。

3.2 高精度无人机航空遥感

卫星遥感及常规的航空遥感由于分辨率相对较低,泥石流物源识别有时图像目标纹理、几何特征不连续,地物提取精度和自动化程度相对较低,在植被覆盖率较高的地段,光学遥感难以穿透植被,使一些泥石流物源无法准确识别,同时常规的遥感影像只能获取地面研究对象的单一视觉影像特征和平面几何信息,难以识别强震区高陡基岩山坡岩体的结构面信息。

近年以无人机为搭载平台的高精度航空遥感技术发展迅速。如激光雷达(LiDAR)点云生成的 DEM 数据反映地貌特征更细微清晰,同时具有一定的植被穿透能力,可以获得高精度的地表真实信息,实现隐蔽泥石流物源的识别及信息提取;高精度倾斜摄影技术可以同时从多个不同的角度获取同一目标的高清影像,弥补了航天航空影像缺乏立体信息等缺陷,为基岩山体三维立体结构面的精细识别与提取提供了丰富的光谱、纹理、形状、上下等信息。激光雷达和倾斜摄影可以作为卫星遥感及常规航空遥感的有益补充。位于藏南及藏东南高海拔、大高差复杂艰险山区的铁路建设,在勘察中采用无人机作为激光雷达及倾斜摄影的平台进行泥石流物源信息的提取,取得了很好的效果^[14]。

3.2.1 高精度无人机机载激光雷达(LiDAR)

基于机载 LiDAR 数据 Point cloud(点云)、

DSM(数字表面模型)、DEM、DOM,结合区域地质、气象水文等资料,根据建立的典型泥石流解译标志,开展泥石流物源解译识别工作。解译采用三维模型、二维影像相结合的技术方法,基于泥石流及其物源发育原理、特征进行物源识别及定性和空间分析;开展斜坡岩体结构解译分析结构面产状测量、体积方量几何尺寸测量、地质分区、地质剖面图生成等相关地质信息分析与提取,预测泥石流物源的规模、范围及边界。

通过采用无人机机载激光雷达对曲宗藏布进行扫描,获取了高精度的数据,数据处理后得到DSM及DEM成果图(图4),根据定位及特征图对比,研究的泥石流堆积体高程范围为3410~3900 m,坡向220°,坡度33°,整体高差约500 m,平均长约1080 m,宽约400 m,整个堆积范围面积约0.33 km²,堆积体平均厚度约50 m,估算堆积体约1.56×10⁵ m³。

高精度无人机机载LiDAR具有以下技术优点:①能有效解决植被高覆盖率山区精确地形数据获取难题,利用激光雷达技术获取高精度地形数据成果,通过地物分类消除茂密植被影响,获取真实的地面数据,为泥石流勘察、治理设计提供准确基础的数据资料。②可准确识别场地工程地质条件,基于激光点云数据生成高分辨数字高程模型(DEM),高效准确识别崩滑流堆积体、沟道松散物源及基岩斜坡的结构面,为全面获取场区泥石流各类物源提供技术保障。③特大泥石流等重大地质灾害早期识别,针对藏南及藏东南复杂艰险山区高位、隐蔽型重大地质灾害,综合应用激光雷达三维数字高程模型(DEM)和二维光学影像(DOM),融合区域地质资料、勘察资料构建三维地质沙盘,形成三维泥石流等地质灾害解译环境,基于工程地质原理开展泥石流等地质灾害早期识别及物源的分析工作,尽可能识别发现工程区域存在的灾害隐患^[15]。

3.2.2 高精度机载倾斜摄影技术

倾斜摄影测量能够避免影像遮挡获取研究对象的立体信息,提供丰富的光谱、纹理、形状、三维特征等信息(图5)。无人机倾斜摄影测量数据处理主要包括数据预处理、空中三角测量、影像匹配、影像融合、数字产品生产,以及三维实景解译环境构建等^[16]。

解译内容包括各类可能成为泥石流物源的不良地质条件(滑坡、崩塌、岩堆、岩屑坡、碎屑流等),

在强震下可能成为潜在泥石流物源需要进行研判的地质信息(岩层产状、岩体结构面等)^[17]。在怒江边某一工点进行倾斜摄影,获取了近5000条结构面产状,借助软件解译处理后获得了真实感的立体图及解译的结构面迹线侧视图(图6)以及结构面迹长信息、产状信息统计迹长频率直方图及产状极点图(图7),同时得到优势结构面组数划分及结构面的张开度,结合结构面的组合特征,可分析斜坡岩体的稳定性。

无人机高精度倾斜摄影不仅真实地反映地物,而且可借助无人机倾斜摄影测量技术的先进手段改进、改革地质测绘方法,减少体力投入和人身风险,提高泥石流物源勘察精度与效率,极大地丰富了航摄影像的数据成果。其具有以下技术特点:①有效改善高海拔、复杂艰险山区泥石流及其物源勘察精度低的难题,无人机倾斜摄影技术既能够辅助完成长大范围内崩滑流、危岩落石等地质灾害调查工作,结合摄影测量技术又可完成岩体结构面产状、断层、卸荷带走向、宽度等信息的识别与提取,可根据结构面的相对关系及张开度对强震后斜坡岩体的稳定性进行分析,是采用传统卫星和航空遥感方式解决泥石流物源识别的有益补充,在小区域和复杂地区高分辨率(最高分辨率可达2~3 cm)影像快速获取方面具有明显优势,可以大大提高泥石流物源识别精度。②提高复杂艰险山区泥石流及其物源勘察效率、降低安全风险,可实现无接触远距离数据获取,大大提高复杂艰险山区泥石流勘察效率。在复杂艰险山区条件下,不良地质现象往往呈规模化发育,由于条件限制地质勘察人员难以到达现场,人烟稀少,救援困难,而通过无人机摄影测量技术可将危险地区的勘察风险极大降低,确保人员在安全的情况下充分获取高精度泥石流物源信息。③丰富地质勘察数据成果,三维空间影像数据中包含着大量的地形、地物、地质信息,可为铁路等长大干线选线、勘察、设计、施工、运营维护全寿命周期直接提供表层数据。

3.2.3 多源遥感技术在长大线状工程各阶段泥石流物源识别中的适用性

长大段落的线状工程,如铁路、公路等工程一般长度达数十千米,甚至上千千米,如穿越横断山、念青唐古拉山、喜马拉雅山等藏南及藏东南复杂艰险山区的铁路建设,在可行性研究阶段需要进行大

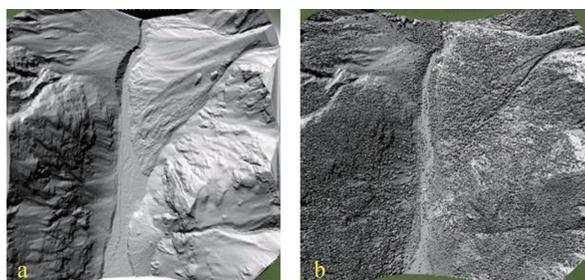


图 4 曲宗藏布泥石流堆积区
Fig. 4 DSM(a) and DEM(b) maps of the debris flow accumulation area in Quzongzangbu



图 5 八曲泥石流三维影像图
Fig. 5 Three-dimensional image of Baqu debris flow

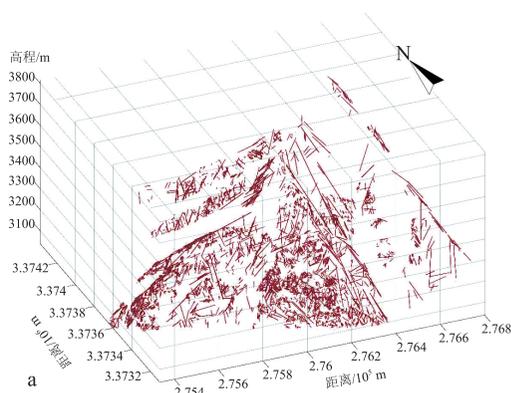


图 6 结构面迹线图
Fig. 6 Structural trace layout and side view of structural trace
a—结构面迹线展布图;b—结构面迹线侧视图

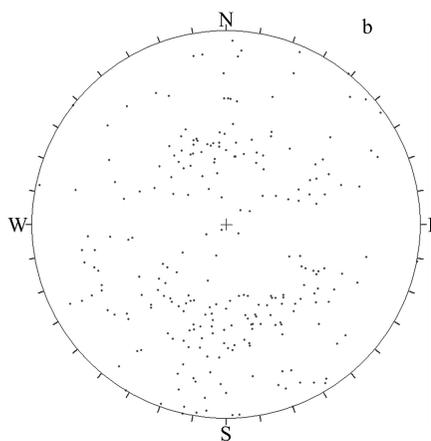
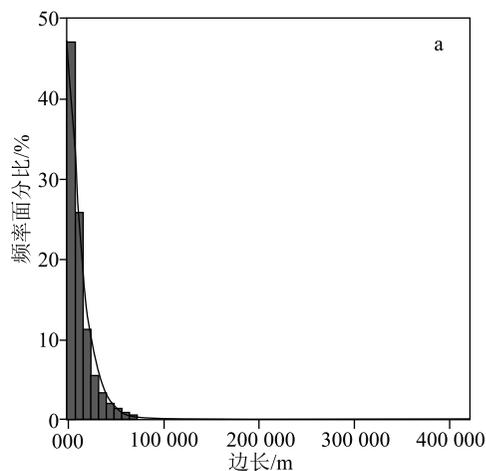


图 7 结构面迹长直方图(a)及产状极点图(b)
Fig. 7 Structure area trace length histogram(a) and occurrence pole map(b)

范围的地质选线,必须对线路可能经过的地区进行泥石流等地质灾害的普查,卫星数据由于覆盖面

广,且有多时段、多品种的数据,因此在可行性研究阶段,采用卫星遥感技术可以对大型的泥石流等不

良地质体进行判断及解译,以选出地质条件较好的交通廊道。

初步设计阶段的工程设置对勘察的精度要求更高,受地形地质条件控制,卫星遥感数据精度显得不足。在基本确定交通廊道后,航空遥感技术手段是一种常见的进行泥石流物源识别的有效手段。数据获取方面,航空遥感数据的获取平台可分为有人机航空遥感平台、无人机航空遥感平台2类。有人机航空遥感平台主要适用于长大范围的航空遥感影像获取,其优势是一次性获取的数据量大、数据质量高、面积大、精度较高^[18]。

无人机作为遥感平台的遥感技术可成为卫星遥感和有人机遥感的有效补充手段,其优点是:可以低空、低速安全飞行获取高清晰度的光学影像,配备轻小型传感器后可获取高分辨率(厘米级)影像,实现高精度三维测量;可以完全由程序控制沿复杂航迹,以复杂姿态飞行,以获取特定工程的多面体影像;灵活、机动,可以无机场起降,适合执行高海拔、大高差复杂艰险山区等困难地区的泥石流物源识别任务。

4 应用实例

4.1 高精度无人机机载 LiDAR 解译崩塌堆积体

BT-01 崩塌堆积体位于波密县境内,高程范围 3415~3820 m(图 8 蓝线范围)。坡向为 253°,坡度为 33°,由于该区海拔高,植被覆盖率高,采取外业地质调查及卫星遥感技术难以查明该堆积体的范围及体积。勘察中采取无人机机载 LiDAR 扫描,同时搭载数码相机进行真实感场景拍摄,经处理后获得 BT-01 崩塌体的三维实景模型及三维灰度模型(图 8),经解译该崩塌堆积体整体高差约 400 m,平均长约 730 m,宽约 320 m,整个堆积范围面积约 0.18 km²,绘制崩塌堆积体的剖面图(图 9),计算出堆积厚度约 40 m,估算堆积体积约 700×10⁴ m³。

4.2 无人机机载倾斜摄影解译斜坡岩体结构面

八曲位于八宿县同卡镇附近,为怒江的二级支流,两岸山势陡峻,高差大,山坡基岩裸露,人员无法到达。为查明坡体的危岩及优势结构面产状,评价基岩斜坡的稳定性及危岩落石的范围,勘察中采用无人机机载倾斜摄影测量技术,获取三维影像,对测区结构面进行了详细解译,共解译结构面 1103 条,依据结构面信息解译数据,进一步

对产状进行分组来描述和统计结构面信息。下面仅介绍迹长大于 25 m 的大型结构面的部分成果图。

(1) 迹线及迹长信息

迹线信息:依据结构面解译数据绘制测区结构面迹线图(图 10)及迹长大于 25 m 的迹线展布图(图 11)。

迹长信息:根据结构面解译信息数据,统计得出结构面迹长的分布状况(图 12)。

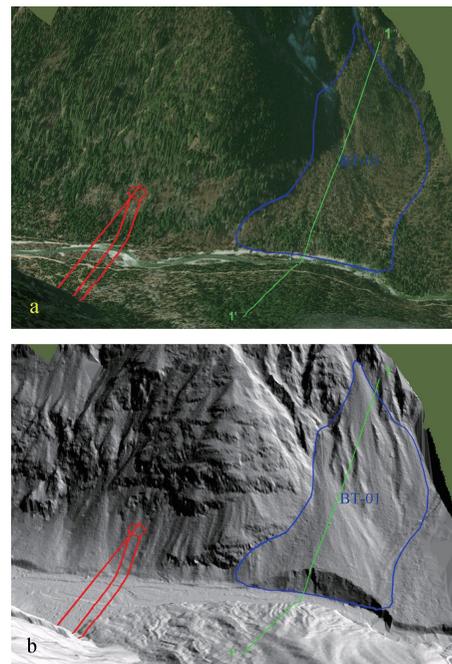


图 8 崩塌堆积体(BT-01)三维模型
(蓝线表示崩塌堆积体;绿线和红线表示崩塌体主轴)
Fig. 8 Three-dimensional model of landslide accumulation (BT-01)
a—三维实景模型;b—三维灰度模型

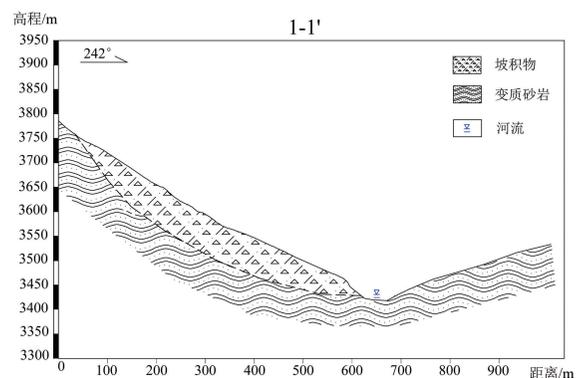


图 9 崩塌堆积体(BT-01)剖面
Fig. 9 Sectional of the collapsed accumulation(BT-01)

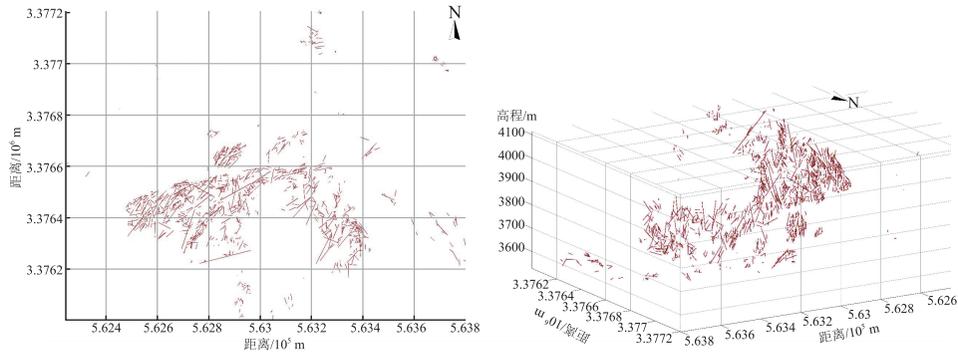


图 10 测区结构面图

Fig. 10 Structure plan of the survey area

a—结构面迹线平面图;b—结构面迹线侧视图

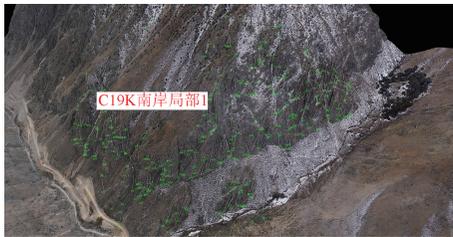


图 11 迹长大于 25 m 的结构面迹线展布图

Fig. 11 Trace layout of structural surface with trace length greater than 25 m

(2) 产状信息

依据解译的结构面数据对测区测量的迹长大于 25 m 的长大结构面数据进行产状优势组数的划分,各优势分组结果采用右手法则表示的走向玫瑰花图见图 13。

岩体边坡的稳定性受岩体结构面尤其是优势结构面的控制,利用倾斜摄影测量技术获得三维影像统计结构面信息,确定边坡岩体优势结构面,结

合结构面力学参数,对边坡稳定性进行检算,同时分析其与其他结构面的关系,最后分析可能成为泥石流物源的危岩体的范围及体积。

5 结 论

通过藏南及藏东南复杂艰险山区从大面积的泥石流普查到小范围的针对性的泥石流物源识别,从宏观的定性分析到微观的定量分析,系统进行了多源遥感技术在泥石流物源识别中的应用分析研究,对类似地区的泥石流物源识别提供借鉴。

(1) 在复杂艰险山区进行铁路、公路等长大线状工程廊道选择阶段(可行性研究阶段),采用传统的地质勘察方法很难甚至无法查明方案选择范围内的泥石流及其物源的识别,利用多源遥感卫星可以起到事半功倍的效果,同时也能满足勘察精度的要求。

(2) 在初步设计阶段,对泥石流及其物源的勘察精度要求更高,卫星遥感的精度显得不足,采用

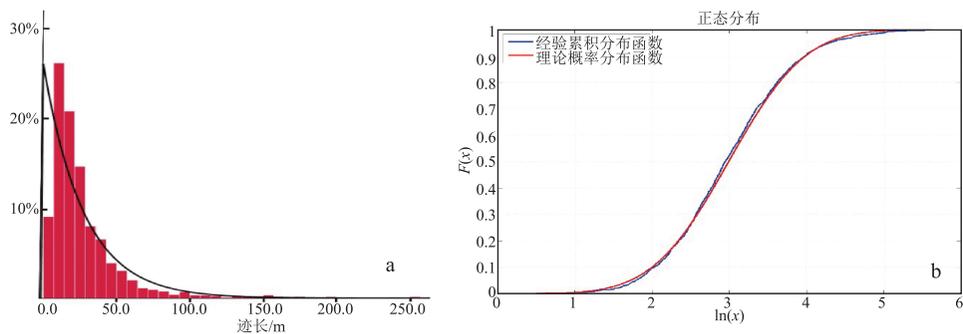


图 12 结构面迹长图

Fig. 12 Long structure map

a—结构面迹长频率直方图;b—结构面迹长累计频率分布图

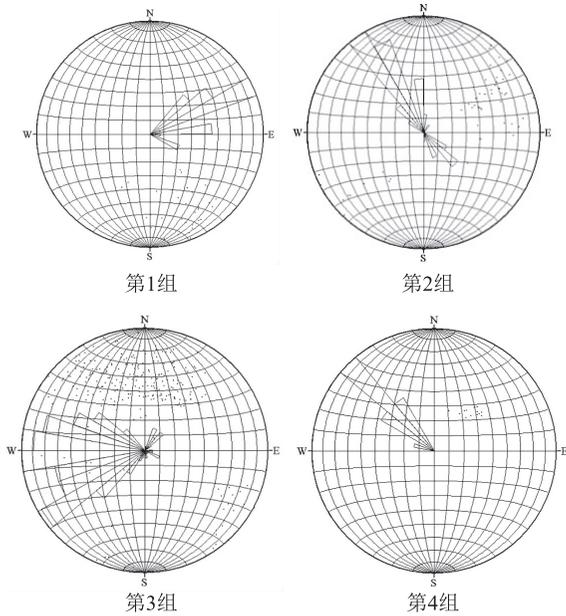


图 13 测区长大结构面分组结果的下半球施密图表示

Fig. 13 The lower hemisphere diagram representation of the grouping results of the large structural planes in the survey area

航空遥感是一种有效的手段,一次航飞就可获取大量的数据。

(3)对于植被覆盖率较高的地段,激光雷达(LiDAR)可以一定程度穿透植被,获得高精度的地表真实信息;倾斜摄影可以获得基岩斜坡丰富的光谱特征、纹理特征及几何特征,完成岩性、结构面产状、卸荷带走向、结构面张开度等信息的识别与提取,对不稳定基岩斜坡的潜在泥石流物源进行评估。

参考文献

- [1] 王闯昭,王恩宁,沈正康,等.基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J].中国科学(D辑),2008,38(5): 582-597.
- [2] 刘桂卫,李国和,陈则连,等.多源遥感技术在艰险山区铁路地质勘察中应用[J].铁道工程学报,2019,36(8): 4-8.
- [3] 王栋,蒋良文,张广泽,等.无人机三维影像技术在铁路勘察中的应用[J].铁道工程学报,2016,33(10): 21-24.
- [4] 程三友,陈静,林海星,等.高分辨率遥感图像几何精校正正在高山峡谷区1:5万地质填图中的应用[J].地质通报,2021,40(4): 520-526.
- [5] 王东明,田世攀,张昱等.森林-沼泽浅覆盖区地质填图方法试验——以黑龙江1:5万望峰公社幅为例[J].地质通报,2021,40(4): 782-797.
- [6] 孟祥连,周福军.真实感场景遥感技术在铁路工程勘察中的应用[J].西南交通大学学报,2017,52(5): 949-955.
- [7] 马洪超.激光雷达测量技术在地学中的若干应用[J].地球科学——中国地质大学学报,2011,36(2): 347-354.
- [8] 南天.无人机倾斜摄影及自动三维建模技术在地质灾害应急测绘中的应用——以三明市妙云山为例[J].测绘与空间地理信息,2019,42(3): 182-184.
- [9] 王凤艳.数字近景摄影测量快速获取岩体裂隙信息的工程应用[D].吉林大学博士学位论文,2006.
- [10] 苗晓岐.喜马拉雅北麓郭如错冰湖泥石流沟发育特征及对拟建中国至尼泊尔铁路的影响研究[J/OL].铁道标准设计,2021.https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202102040007.
- [11] 程尊兰,朱平一,党超,等.藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势[J].冰川冻土,2008,(12): 954-959.
- [12] 范一大,杜志强,王薇,等.典型地质灾害遥感监测评估技术与实践[M].北京:科学出版社,2017.
- [13] 国家铁路局.铁路工程地质遥感技术规程[S].北京:中国铁道出版社,2018.
- [14] 赵英时,等.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2019.
- [15] 杜世回.高原极复杂山区无人机激光雷达技术应用研究[J].铁道工程学报,2021,269(2): 13-18.
- [16] 周福军.高原复杂山区铁路无人机倾斜摄影勘察技术应用研究[J].铁道标准设计,2020,65(6): 1-5.
- [17] 周福军.复杂山区铁路“空天地内信”勘察技术研究[J].铁道工程学报,2020,37(8): 1-5.
- [18] 管建军.无人机倾斜摄影测量精度分析与泥石流单体要素提取及易发性评价研究[D].河南理工大学硕士学位论文,2018.