

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

赵婷婷, 高文娟, 李志林, 廖露, 陈笑峰

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

ZHAO Tingting, GAO Wenjuan, LI Zhilin, LIAO Lu, and CHEN Xiaofeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

九寨沟地震区公路沿线地质灾害发育规律及防治对策

Developmental regularity and preventive countermeasures of geological disasters along the highway in Jiuzhaigou earthquake area

程强, 胡朝旭, 杨绪波 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 114-120

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

九寨沟地震生态敏感区评估与道路重建方案论证

Evaluation of Jiuzhaigou earthquake ecological sensitive area and demonstration of road reconstruction plan

汪晓锋, 朱圻, 向波 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 70-78

综合勘察方法在蒙华铁路石膏矿采空区选线勘察中的应用

Application of comprehensive survey methods in the gypsum mine goaf for Mengxi-Huazhong railway route selection

谢猛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 58-64

基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价

$\${suggestArticle.titleEn}$

杨华阳, 许向宁, 杨鸿发 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 20-29

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209016

赵婷婷, 高文娟, 李志林, 等. 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 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 93-99.

ZHAO Tingting, GAO Wenjuan, LI Zhilin, et al. Application of real-scene 3D technology in the rapid survey of geological disasters after the “8·8” Jiuzhaigou earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 93-99.

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

赵婷婷^{1,2}, 高文娟^{1,2}, 李志林^{2,3}, 廖露^{1,2}, 陈笑峰^{1,2}

(1. 四川省测绘地理信息局测绘应急保障中心, 四川成都 610081; 2. 自然资源部应急测绘技术创新中心, 四川成都 610081; 3. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756)

摘要:针对“8·8”九寨沟地震地质灾害快速调查应急测绘保障中, 倾斜实景三维模型建模效率无法满足应急状态下“快速”的需求这一难题, 文中在研究无人机倾斜摄影测量技术原理的基础上, 提出了基于正射单视角倾斜摄影的三维建模方法, 进一步结合三维场景构建技术和遥感解译技术构建了应急状态下基于实景三维技术的地质灾害快速调查技术体系, 并成功应用于“8·8”九寨沟地震地质灾害快速调查中, 72 小时黄金救援期内提供了四川省应急测绘保障史上首个实景三维模型及相关灾情、灾损信息, 在有关部门开展灾情研判、应急指挥决策、灾后恢复重建等工作中发挥了重要作用, 此外, 基于调查结果提出了系列灾区地质灾害防灾减灾救灾建议, 为灾区地质灾害综合防治提供了科学依据。

关键词:九寨沟地震; 地质灾害快速调查; 单镜头倾斜摄影测量; 三维场景构建; 遥感解译

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)03-0093-07

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

ZHAO Tingting^{1,2}, GAO Wenjuan^{1,2}, LI Zhilin^{2,3}, LIAO Lu^{1,2}, CHEN Xiaofeng^{1,2}

(1. Emergency Surveying and Mapping Center of Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Emergency Mapping Technology Innovation Center, MNR, Chengdu, Sichuan 610081, China;

3. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University

Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: In response to the challenge of inefficient oblique-photography 3D modeling in emergency surveying and mapping support for the rapid investigation of geological disasters caused by the “8·8” Jiuzhaigou earthquake, this paper proposes an orthographic single-view oblique 3D modeling method based on the study of UAV oblique photogrammetry technology. By combining it with 3D scene construction technology and remote sensing interpretation technology, a comprehensive system for rapid geological disaster investigation using real-scene 3D technology in emergency situations was developed. This system was successfully applied during the rapid investigation of geological disasters after the “8·8” Jiuzhaigou earthquake, providing real 3D models and related information on disasters and damages within the critical 72-hour rescue period. It marked the first time in

收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-10-28 投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 自然资源技术融合研究与应用示范(121 204 007 000 204 101)

第一作者: 赵婷婷(1988-), 女, 辽宁省大石桥市人, 博士研究生, 注册测绘师, 测绘高级工程师, 主要从事应急测绘与防灾减灾、三维 GIS、自然资源调查监测等工作。E-mail: 767163826@qq.com

the history of emergency surveying and mapping support in Sichuan Province that a real-scene 3D model was provided, and it played a critical role in disaster assessment, emergency command and decision-making, as well as post-disaster recovery and reconstruction efforts by relevant authorities. Furthermore, based on the survey results, a series of suggestions for geological disaster prevention, mitigation, and relief were proposed, serving as a scientific basis for the comprehensive prevention and control of geological disasters in affected areas.

Keywords: Jiuzhaigou earthquake; geological disaster rapid survey; orthographic single-view oblique photogrammetry; 3D scene construction; remote sensing interpretation

0 引言

2017年8月8日21时19分,四川省阿坝州九寨沟县发生 $M_s 7.0$ 级地震,震中位于九寨沟县漳扎镇九寨沟风景名胜区内,震源深度20 km、最大烈度9度。地震发生后,四川省测绘地理信息局立即响应习近平总书记“抓紧了解核实地震灾情”、“最大限度减少人员伤亡”的重要指示和要求,迅速启动应急测绘保障预案。省测绘应急保障中心连夜奔赴灾区,9日19时成功获取并制作漳扎镇附近九寨沟沟口至五彩池、彭丰村、永竹村、达基寺等区域0.2 m分辨率正射影像70 km²及九寨沟县城0.16 m分辨率正射影像30 km²。10日16时,又紧急获取并制作九寨沟景区及上四寨至甘海子区域0.16 m分辨率正射影像63 km²,为开展灾区应急救援工作提供了灾后第一手地理信息资料。

此次地震破坏力强、波及范围广,涉及四川、甘肃两省4个市(州)8个县,不仅造成了严重的人员伤亡和经济财产损失,还诱发了严重的地质灾害^[1],对山体边坡稳定性造成严重影响,形成大量地质灾害隐患^[2-3],在强烈余震和汛期雨水双重刺激下,地质灾害风险急剧增加,呈高发易发态势,使灾区人民的生命财产安全和九寨沟景区的生态环境持续受到严重威胁,地质灾害快速调查迫在眉睫。九寨沟地处川西高山峡谷区,地质灾害多呈现远程高位、植被覆盖度高、人员难以到达等特点,调查工作需更多依赖于灾区的地理信息资料,但二维的地理信息资料凸显出地质灾害严重程度不够直观、滑坡崩塌等定量评估难、地质灾害隐患发现难等一系列局限性,亟需三维地理信息资料的有效支撑。近年来,倾斜摄影测量技术高速发展,能够通过一系列数据处理工艺流程构建研究区域的实景三维模型,直观的反应研究区域的地形地貌地物信息,被广泛应用于土地调查、地籍测绘、河湖治理、农业林业、智慧城市、交通规划等众多领域,同时也被越来越多地应用于地质灾害隐患的早期识别与监测、地质灾害调查与评价等工作中^[4-6]。但在应急状态下,受影像数据量、工艺流程、软

硬件设备等因素影响,建模效率不高,无法满足应急状态下“快速”的需求^[7-8]。

为破解上述难题,本文通过研究无人机倾斜摄影测量技术原理,提出基于正射单视角无人机航空影像的倾斜三维建模方法,进一步,结合三维场景构建技术及遥感解译技术建立了应急状态下基于实景三维技术的地质灾害快速调查技术体系,并成功应用于“8·8”九寨沟地震地质灾害快速调查应急测绘保障工作中,最后,基于调查结果对灾区地质灾害综合防治提出了科学可靠的防灾减灾救灾建议。

1 无人机倾斜摄影测量技术流程

无人机倾斜摄影测量技术是集无人机技术、倾斜摄影技术和摄影测量技术于一体,近年来国际测绘领域快速发展的一项先进技术。它是通过在同一无人机平台上搭载多台航摄像机,同时从垂直、倾斜多个角度采集地表影像信息,并通过对多视影像进行空中三角测量恢复多视影像的空间位置和姿态,从而使影像的每个像素都对应有真实的地理坐标信息,实现倾斜影像数据的实时量测,能够从多个角度真实地反映地物及周边的真实情况。在此基础上通过多视影像密集点云匹配生成测区高密度数字地表模型(digital surface model, DSM)和不规则三角网表面模型(白模),再通过纹理自动映射构建测区倾斜实景三维模型,技术流程如图1所示。

1.1 无人机多视影像数据获取

无人机多视影像数据获取的相对航高、地面分辨率、像元尺寸大小、航向及旁向重叠度等技术参数关系着影像数据质量、覆盖范围等,是后续多视影像处理、模型重建的基础,因此数据获取前需根据实际地形、气候等因素通过专业航线规划软件进行科学的航线规划设计并生产飞行计划文件。该文件包含无人机的航线坐标和各相机曝光点坐标位置,实际飞行中,各相机则根据对应的曝光点坐标自动同步曝光拍摄获取垂直、倾斜不同视角的地表影像数据,同时,在每个曝光点位置通过相机上集成的定位定姿系统(position and orienta-

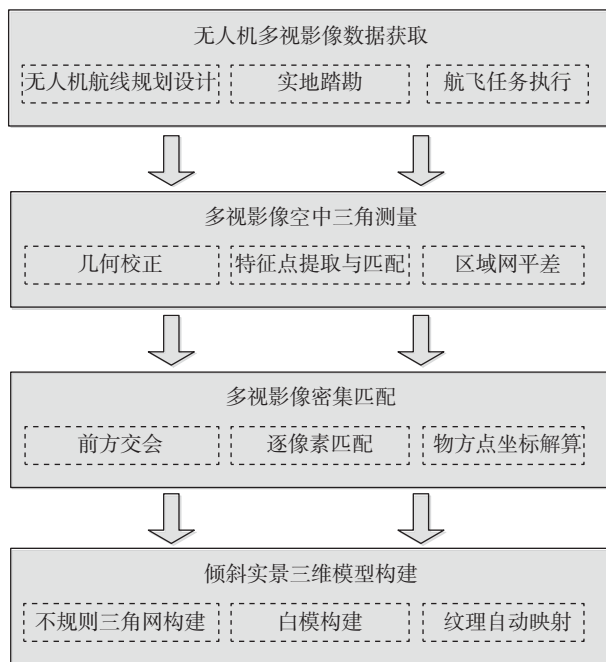


图1 倾斜实景三维模型构建技术流程图

Fig. 1 Flowchart of oblique real-scene 3D model construction technical

tion system, POS)同步获取 POS 数据, POS 数据主要包括全球定位系统(global positioning system, GPS)数据和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)数据,即倾斜摄影中的外方位元素:经度(X)、纬度(Y)、高程(Z)、航向角(Φ)、俯仰角(Ω)及翻滚角(κ)^[9-10]。由此拍摄获取的倾斜影像具有精度高、分辨率高、信息(特别是侧面)丰富等特点,可为用户多角度浏览、实时量测、三维展示等提供多方面信息。

1.2 多视影像空中三角测量

多视影像空中三角测量是倾斜摄影产品生产的关键步骤,大多基于光束法空中三角测量原理,以投影中心点、像点和相应的地面点三点共线为条件,以单张影像为解算单元,借助影像之间的公共点和野外控制点,通过中心投影的共线条件方程,把各张影像的光束连成一个区域进行整体平差,由每个像点的坐标观测值可以列出两个相应的误差方程式,按最小二乘准则平差,求出每张相片外方位元素的6个待定参数,从而得出各加密点的坐标^[9]。

由于倾斜影像拍摄时倾斜角和旋转角都较大,进行多视影像联合空中三角测量首先需要对斜视影像进行几何校正。其流程是利用高精度 POS 数据中的外方位元素和设计航高信息,根据共线条件方程求解原始斜视影像与纠正后影像间的单应矩阵,进而利用数字微分对斜视影像进行纠正,纠正后的斜视影像消除了因大倾角

和旋转角引起的影像几何形变,只剩下因地形起伏引起的像点位移,如图2所示。在此基础上可进一步利用传统特征提取算法提取特征点,并利用相似性测度在其他序列影像中追踪提取相匹配的特征点,从而实现像对间的特征点匹配。最后利用最小二乘法光束法区域网平差求解每张影像的外方位元素和加密点坐标,从而恢复多视影像在虚拟三维空间中的位置和姿态。经过空中三角测量后的多视影像可进行实时量测,每个像素对应真实的地理坐标信息^[10-13]。



(a) 纠正前



(b) 纠正后

图2 纠正前后的斜视影像

Fig. 2 Strabismus image before and after correction

1.3 多视影像密集点云匹配

多视影像密集点云匹配是在空中三角测量加密成果的基础上,通过前方交会,对每个像对进行逐像素匹配,即利用像对中每个同名点的坐标信息,结合外方位元素,逐一求解所有未知物方点的三维坐标,进而重建反映测区地形地物起伏特征的高密度点云数字表面模型^[14],如图3所示。



图3 高密度点云数字表面模型

Fig. 3 High-density point cloud digital surface model (DSM)

1.4 倾斜实景三维模型构建

基于多视影像密集匹配生成的高密度点云数字地表模型,构建不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)模型,进而生成三角网表面模型(白模),并根据白模三角面对应的倾斜影像为模型面自动映射纹理信息。纹理自动映射原理是利用白模三角面角点的物方坐标(X, Y, Z)、倾斜影像的外方位元素及倾斜影像本身的物方坐标(X, Y, Z),通过判断每张影像与该模型面是否空间相交筛选出与模型面相对应的所有影像集,以便于挑选最佳影像面作为模型面纹理,并利用共线方程计算出所选模型面在每张影像上的投影点坐标(x, y),再通过筛选算法按照影像质量及影像投影面最优原则将影像集排序,选择最优影像纹理并计算出纹理坐标,自动映射到模型面上^[15-16],从而构建生成具有高分辨率纹理的测绘级精度倾斜实景三维模型。

2 基于正射单视角倾斜摄影的三维建模方法

在“8·8”九寨沟地震次生地质灾害应急测绘保障中,重新协调空域、等待小气候窗口、开展航飞作业获取多视倾斜航空影像数据需耗用一定时间,同时多视倾斜实景三维场景构建耗时较长,无法满足应急时效要求。因此,结合无人机倾斜摄影测量技术原理,本文提出一种正射单镜头倾斜三维建模方法,即利用灾区已获取的正射单镜头无人机航空影像(相当于倾斜摄影中垂

直方向的相机获取的下视影像)作为影像数据输入源,通过上述倾斜实景三维模型构建的技术流程,构建灾害现场的第一手实景三维模型,为应急救援、指挥决策、灾损评估等提供三维地理信息数据支撑。

单镜头倾斜三维模型构建较常规倾斜三维模型构建,在输入的影像数据量方面大幅减少,因此建模效率得到显著提升。本文选取受灾严重的九寨沟景区作为研究区域,利用 DB-2 无人机(升限 6 000 m,航时 3 h,测控距离 ≥ 30 km)搭载 Canon 5DS 全画幅相机(焦距为 35.78 mm)获取九寨沟景区 8 699 张正射单镜头无人机航空影像(像素大小为 4.1 μm ,影像尺寸为 8 688 \times 5 792,地面分辨率优于 0.15 m),该区域海拔约为 3 000 m,森林覆盖率超过 80%,是典型的高山峡谷地貌,地震发生后,景区内发生大面积滑坡、崩塌等地质灾害,呈现出高位远程、植被覆盖度高、人员难以达到的特点。本文通过提出的正射单镜头倾斜三维建模方法,利用两台高性能图形工作站(硬件配置如表 1 所示)组成局域网进行并行运算,仅用时 13 h 31 min,便制作完成九寨沟核心景区 56 km^2 的有效实景三维模型,如图 4 所示,模型完成后第一时间提供给中国地震局,四川省地震局、公安厅、原国土厅、应急救援指挥部、成都理工大学等单位研判灾情使用,使全体救援队伍都能身临其境感知灾情,实现了四川省应急测绘保障史上首次实景三维应急测绘保障服务。

表 1 正射单镜头倾斜三维建模并行运算硬件配置表

Table 1 Hardware configuration table for orthographic single-lens oblique 3D modeling parallel computing

型号	T7910	T7610
显卡	NVIDIA GOFORCE GTX 1 080	NVIDIA Quadro K6000
处理器	Inter(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v3@2.4 GHz 2.4 GHz (2处理器)	Inter(R) Xeon(R) CPU E5-2687 W v2@3.40 GHz 3.40 GHz (2处理器)
安装内存	64.0 GB	64.0 GB

研究区域正射单镜头无人机航空影像获取的航向及旁向重叠度分别为 80% 及 75% 以上(图 5),均高于 CH-Z3005-2010《低空数字航空摄影规范》的最高要求,无相对和绝对航摄漏洞,能够确保足够的特征点匹配范围,同时 Canon 5DS 全画幅相机获取正射影像时在视场角范围内能拍摄到一定的地形地貌地物侧面信息,从而保证了三维建模中密集点云匹配的有效性。本文通过正射单镜头倾斜三维建模方法构建的实景三维模型完整、连续、无较大漏洞及大片悬浮面片,色调均匀一致,无明显拼接痕迹,过渡自然且结构细节保留完整,客观、真实地反映了景区内地表地物起伏变化及植被覆盖情况,顶视纹理精度接近原始影像分辨率(图 6)。相

比于多视倾斜三维模型构建的实景三维模型,正射单镜头实景三维模型的侧面纹理存在一定程度的损失(图 7),可通过公式 $GSD = H \times a / f$ 进行解算,式中: GSD 为地面分辨率/m, H 为相对航高/m, a 为像元大小/mm, f 为镜头焦距/mm,但相对于较大空间尺度的地形地貌及滑坡、崩塌等地质灾害,不影响其认识与调查,完全能够满足应急状态下各部门应急救援、指挥决策、灾损评估等防灾减灾救灾的使用需求。

3 实景三维展示平台搭建与灾情解译

倾斜实景三维模型具有高精度的空间位置信息和高分辨率的纹理细节信息,能够真实、直观、完整、准



图 4 九寨沟景区实景三维模型

Fig. 4 Real-scene 3D model of Jiuzhaigou scenic area



图 6 模型顶视纹理(左)与原始影像(右)分辨率对比图

Fig. 6 Top-view texture of the model (left) and original image (right) resolution comparison



图 7 实景三维模型侧面纹理情况

Fig. 7 Side-view texture of the real-scene 3D model

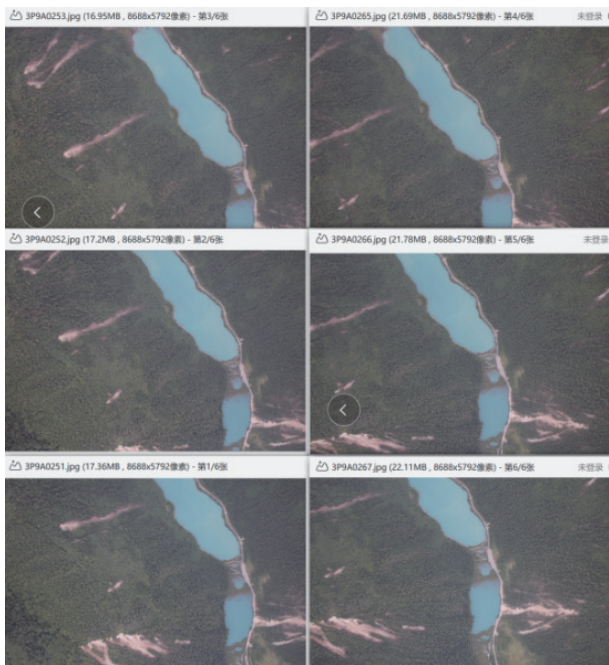


图 5 获取影像的航向及旁向重叠度

Fig. 5 Heading and lateral overlap of acquired images

确地反映灾区的受灾情况和灾损情况,为地质灾害调查提供了新的技术手段^[17]。本文利用地形场景构建技术,通过单镜头倾斜三维建模构建过程中生成的灾区 DSM 数据,制作灾区地形数据加载到 skyline 平台中,以此为基底加载倾斜实景三维模型,迅速搭建起灾害现场的真三维展示平台,实现了灾害现场 720°浏览和精准量测,打破了传统数字正射影像(DOM)叠加数字高程模型(DEM)模拟地表三维地形的局限。进一步,利用遥感解译技术,建立滑坡、崩塌,泥石流等地质灾害解

译标志,并基于倾斜实景三维模型开展地质灾害灾情解译,分析地质灾害边界范围、分布高程、面积等信息,以及房屋、道路、桥梁等基础设施受损情况,从而实现应急状态下基于实景三维技术的地质灾害快速调查。

通过调查发现,九寨沟核心景区内崩滑等次生地质灾害面积大、范围广,大多地处高位(图 8),对景区山坡地表和景观破坏明显,主要分布在九寨沟景区的树正寨、若日朗、日则等区域。箭竹海、熊猫海、五花海三处海子因发生崩滑已变浑浊。景区内崩滑等地质灾害共 247 处,灾害密度约 5 处/km²,镜海至箭竹海道路断道 29 处,受损公路总长度约为 4 km,下季节海子断道 2 处,对景区生态环境及居民生命财产安全构成严重威胁,调查结果在原四川省国土厅研判地质灾害隐患中发挥了重要作用。

4 结论与建议

本文通过理论研究与“8·8”九寨沟地震次生地质灾害应急测绘保障实践,证实了基于正射单镜头倾斜摄影三维建模方法的有效性和高效性,于黄金救援 72 小时内提供了灾害现场实景三维测绘地理信息产品,为应急指挥决策、定量灾损评估、灾后恢复重建、次生地质灾害防治等工作提供强有力的技术支撑和数据保障,实现



图 8 “8·8”九寨沟地震核心景区地质灾害分布

Fig. 8 Distribution of geological disasters in the core scenic area of the “8·8” Jiuzhaigou earthquake

了四川省应急测绘保障史上首次实景三维应急测绘保障服务,突破了以往只能提供二维测绘地理信息产品的瓶颈,丰富了应急测绘地理信息产品形式。研究形成的基于实景三维技术开展地质灾害调查的技术体系,已成功应用至四川省九寨沟地震灾后恢复重建重大专项《“8·8”九寨沟地震灾区恢复重建地质灾害防治遥感测绘调查》重大专项中,对九寨沟景区及周边受威胁人数众多的重大地质灾害点连片区域,开展 150 km² 的单镜头倾斜实景三维模型建设并基于此开展地质灾害调查工作。

此外,基于“8·8”九寨沟地震地质灾害调查结果和灾区实际,本文进一步提出如下灾区地质灾害防灾减灾救灾的科学建议:

(1)地震发生时间正值四川省主汛期,大量崩滑点在降雨条件下极易再次活动,并引发新的崩滑流灾害,建议在应急救援后继续采用天-空-地一体化的调查手段,对靠山边的村镇、泥石流沟口地带、人口密集区尽快开展系统的排查与评估,划定危险区,及转移危险区人员。

(2)地震灾区参与排查与抢险的队伍在选择驻地时应避开沟口或陡崖下,以免次生灾害造成人员伤亡,同时根据灾区地质灾害分布情况,注意避让可能发生的崩滑灾害。

(3)九寨沟震区历史上曾遭受 1879 年邻近的甘肃

文县地震、1933 年叠溪地震、1976 年松潘-平武地震、2008 年汶川地震等大地震以及本次强烈地震的扰动和影响,使高位震裂山体损伤进一步累积,在强余震和震后降雨的激发下,要警惕类似“6·24”叠溪新磨村高位大型岩质滑坡发生造成的群死群伤灾害,建议可进一步利用激光雷达技术加强对高位震裂山体的排查和监测预警工作^[18],预防大型崩塌滑坡造成的人员伤亡。

参考文献 (References):

- [1] 四川省人民政府.“8·8”九寨沟地震灾后恢复重建总体规划 [EB/OL]. 2017-11 [2022-07-29]. <https://www.sc.gov.cn/10462/c103044/2017/11/8/839f1c6c29084d27b59348d64b91b627.shtml>. [Sichuan Provincial People's Government. "8·8" Jiuzhaigou Earthquake post-disaster recovery and reconstruction master plan [EB/OL]. 2017-11 [2022-07-29]. <https://www.sc.gov.cn/10462/c103044/2017/11/8/839f1c6c29084d27b59348d64b91b627.shtml>. (in Chinese)]
- [2] 罗路广,裴向军,谷虎,等.基于GIS的“8·8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价[J].自然灾害学报,2020,29(3):193-202. [LUO Luguang, PEI Xiangjun, GU Hu, et al. Risk assessment of geohazards induced by “8·8” earthquake based on GIS in Jiuzhaigou scenic area [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 193-202. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 谭超,田述军,李铭杨.九寨沟地震前后地质灾害对景区通达性影响与对策研究[J].公路,2021,66(6):214-221. [TAN Chao, TIAN Shujun, LI Mingyang. Study on the influence of geological disasters on the accessibility of scenic spots before and after Jiuzhaigou earthquake and its countermeasures [J]. Highway, 2021, 66(6): 214-221. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 贾虎军,王立娟,范冬丽.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[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):60-65. [JIA Hujun, WANG Lijuan, FAN Dongli. The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 60-65. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 康尘云.基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价——以重庆万州观音山危岩带为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(5):66-75. [KANG Chenyun. Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: A case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 66-75. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈洁,蔡君,李京,等.倾斜航空摄影技术及在地质调查中的应用研究——以三峡库区巫峡地区为例[J].国

- 土资源遥感, 2021, 33(1): 167-173. [JIE Chen, JUN Cai, JING Li, et al. Oblique aerial photography technology and its application to geological survey: A case study of Wuxia section in the Three Gorges Reservoir [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021, 33(1): 167-173. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 黄敏儿, 南胜, 周兴华, 等. 点面结合的无人机倾斜摄影解决方案在应急测绘保障中的应用 [J]. 城市勘测, 2017(2): 89-92. [HUANG Miner, NAN Sheng, ZHOU Xinghua, et al. The application on emergency surveying and mapping service based on the vertical and oblique image fusion in comprehensive and individual way [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(2): 89-92. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杜新远, 冯磊, 胡江伟. 基于无人机倾斜摄影的应急测绘系统设计与应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(12): 193-196. [DU Xinyuan, FENG Lei, HU Jiangwei. Design and application of emergency surveying and mapping system based on unmanned aerial vehicle tilt photography [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(12): 193-196. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 崔璐璐, 别君, 董梁. 基于倾斜摄影测量技术的三维建模原理及方法研究 [C] //中国海洋学会2015年学术年会论文集, 2015: 62-67. [CUI Lulu, BIE Jun, DONG Liang. Research on principle and method of 3D modeling based on tilt photogrammetry [C] //Proceedings of the 2015 Annual Conference of the Chinese Society of Oceanology, 2015: 62-67. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 麻金继, 梁栋栋. 三维测绘新技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2018. [MA Jinji, LIANG Dongdong. New technology of 3D surveying and mapping [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 闫利, 叶志云. 几何约束条件下的SIFT倾斜影像匹配 [J]. 测绘通报, 2016(1): 37-40. [YAN Li, YE Zhiyun. Image matching with SIFT for oblique photography under geometry constraint [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(1): 37-40. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 闫利, 费亮, 叶志云, 等. 大范围倾斜多视影像连接点自动提取的区域网平差法 [J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 310-317. [YAN Li, FEI Liang, YE Zhiyun, et al. Automatic Tie-points extraction for triangulation of large-scale oblique multi-view images [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(3): 310-317. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 苗晓岐. 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 [J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2052-2060. [MIAO Xiaoqi. Application of multi-source remote sensing technology in debris flow source identification in difficult and complicated mountainous areas in southeastern Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(12): 2052-2060. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 闫利, 费亮, 陈长海, 等. 利用网络图进行高分辨率航空多视影像密集匹配 [J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1171-1181. [YAN Li, FEI Liang, CHEN Changhai, et al. A multi-view dense matching algorithm of high resolution aerial images based on graph network [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(10): 1171-1181. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 闫利, 程君. 倾斜影像三维重建自动纹理映射技术 [J]. 遥感信息, 2015, 30(2): 31-35. [YAN Li, CHENG Jun. Automatic texture mapping of 3D reconstruction based on oblique imagery [J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(2): 31-35. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘力荣, 左建章, 岳贵杰. SWDC-5倾斜摄影建筑物纹理自动映射方法 [J]. 测绘科学, 2015, 40(8): 68-71. [LIU Lirong, ZUO Jianzhang, YUE Guijie. Building texture auto-mapping based on SWDC-5 oblique photogrammetry [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(8): 68-71. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 闫驰, 焦润成, 曹颖, 等. 无人机倾斜摄影在泥石流灾害识别分析中的应用——以北京房山区史家营曹家坊泥石流为例 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 251-257. [YAN Chi, JIAO Runcheng, CAO Ying, et al. The application of UAV oblique photography in debris flow disaster identification and analysis: Taking the debris flow in Caojiafang, Shijiaying, Fangshan District, Beijing as an Example [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(4): 251-257. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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)]