

引用格式:刘飞,朱庆,丁雨淋,曾浩炜,余金星,谭荣志.滑坡—堰塞湖灾情无人机应急测绘、分析与险情模拟[J].山地学报,2021,39(4):600-610.

LIU Fei, ZHU Qing, DING Yulin, ZENG Haowei, SHE Jinxing, TAN Rongzhi. Analysis and Simulation of Landslide-barrier Lake Disaster Based on UAV Emergency Mapping [J]. Mountain Research, 2021, 39(4):600-610.

滑坡—堰塞湖灾情无人机应急测绘、分析与险情模拟

刘飞^{1,2},朱庆^{1*},丁雨淋¹,曾浩炜¹,余金星²,谭荣志^{3*}

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院,成都 611756; 2. 四川测绘地理信息局测绘技术服务中心,成都 610081;

3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室,成都 610041)

摘要: 基于无人机的应急测绘工作以快速提供描述性的静态地图产品为主,难以有效支撑过程复杂、动态变化的滑坡—堰塞湖灾害链精准应急决策指挥需要。本文在回顾无人机应急测绘现状基础上,针对滑坡—堰塞湖灾害链特点,构建了基于无人机应急测绘数据的滑坡—堰塞湖灾情精准分析与险情动态模拟的指标体系和技术路线,并以金沙江白格滑坡—堰塞湖无人机应急测绘保障为例验证了其可行性与适用性。结果表明:(1)本文提出的指标体系系统地反映了滑坡—堰塞湖灾害链特征参数,在量化灾情分析与险情模拟中具有基础性作用;(2)利用本技术方法成功预测了金沙江白格二次滑坡,模拟了最优开挖路径与开挖方量,提供了堰塞湖应急疏通最优方案;(3)应急测绘亟需向提供更加综合的诊断性和预测性专业化知识服务方向转变,加强与相关专业技术融合,更好服务应急指挥与抢险救灾。

关键词: 无人机;应急测绘;白格滑坡;堰塞湖

中图分类号: P208

文献标志码: B

我国西南峡谷山区山脉纵横起伏、地形陡峻、沟谷深切,加之剧烈的地质构造运动,致使区域地质灾害频发^[1]。尤其是滑坡—堰塞湖灾害十分突出,因其威胁范围广、造成的损失重、防治难度大、社会关注度高特点,历来是地质灾害防治研究的重点。相较于一般的滑坡灾害,滑坡—堰塞湖灾害应急响应既具有一般滑坡灾害“灾情应急”的特点,也具有堰塞湖灾害“险情应急”的特点^[2],需要应急测绘工作

为其提供既“快”又“准”的技术保障支撑。

由于多云多雨、极端气象以及高山峡谷等复杂环境局限,卫星遥感和大飞机航空遥感等手段很难满足快速、精准的应急测绘保障需求。目前,无人机遥感因其机动灵活、精准高效、成本低廉等优点,已在各类重大地质灾害应急测绘中广泛应用,成为灾情信息快速获取的重要手段^[3-6]。针对兼具灾情应急和险情应急特点的滑坡—堰塞湖灾害,本文利用

收稿日期 (Received date): 2020-08-03; **修回日期** (Accepted date): 2021-07-26

基金项目 (Foundation item): 四川省测绘地理信息局自然资源技术融合研究与应用示范项目(121204007000204101);中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题山地小流域灾害动力学过程和多尺度风险制图(XDA23090303)。[Research and Application Demonstration of Natural Resource Technology Integration of Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geo-information (121204007000204101); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23090303)]

作者简介 (Biography): 刘飞(1985-),男,四川简阳人,博士研究生,主要研究方向:自然资源遥感与应急测绘。[LIU Fei (1985-), male, born in Jianyang, Sichuan province, Ph.D candidate, research on resource environment remote sensing and emergency surveying and mapping] E-mail: scyjch@qq.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 朱庆(1966-),男,四川仁寿人,博士,教授,主要研究方向:多维动态GIS与虚拟地理环境。[ZHU Qing (1966-), male, born in Renshou, Sichuan province, Ph.D., professor, research on dynamic GIS and VGE] E-mail: zhuq66@263.net。
谭荣志(1982-),女,四川简阳人,工程师,主要研究方向:山地灾害防灾减灾。[TAN Rongzhi (1982-), female, born in Jianyang, Sichuan province, Engineer, research on mountain hazards prevention and mitigation] E-mail: 122592151@qq.com

无人机应急测绘数据构建了滑坡—堰塞湖灾情精准分析和险情动态模拟的特征参数指标体系,探讨了应急测绘从数据提供到知识服务的转变路径。

1 无人机应急测绘现状

应急测绘是通过综合利用各种测绘技术手段,在最短时间内为各级政府和救援机构开展应急决策、救援处置、灾害评估等工作提供可靠的数据获取、处理、管理与测绘成果及保障服务的一项基础性工作^[7]。美国、日本、意大利等发达国家较早建立了完善的应急测绘技术体系,相比之下我国应急测绘技术起步较晚。但是,自2008年汶川特大地震以来^[8],我国应急测绘技术已广泛应用于地震^[3,7,9-10]、滑坡^[6,11]、泥石流^[12-13]、洪水^[14]等防灾减灾工作,取得了长足发展。

目前,基于无人机应急测绘的数据获取与处理技术日趋成熟,且具有了相当高的精度^[4,6,15]。数据源主要依靠光学传感器获取的可见光影像,成果主要包括数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)、数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、三维模型、专题图件等。其中,DOM主要用于灾情解译、灾损评估、影像专题图件制作等方面,通常是应急测绘保障工作中最先提供的成果;三维模型因其直观、可多视角浏览等优点,在应急指挥中具有显著优势,但因其生产耗时较长,一般在应急会商阶段才能提供;对于DSM和DEM数据,其是精确评估灾害规模、分析地形地貌变化情况、制定抢险处置方案的关键数据^[16]。

随着灾害应急行政指挥需求与应急测绘技术的不断融合,前者对后者需求已不再满足于仅仅提供静态的描述性地图产品,而迫切需要更加综合的诊断性和预测性的专业化知识服务^[17-18],即如何利用无人机应急测绘获得的DOM、DEM以及三维模型等成果,准确提取灾情相关的特征参数,开展灾情快速分析和险情动态模拟,为应急指挥提供更加直接的知识决策服务。目前,对于滑坡灾害,已有研究侧重于灾情分析,比如灾情解译^[19]、灾害规模计算^[5]、滑坡体和堆积体形态分析^[20]、次生灾害研判^[21]等;在险情处置模拟方面,主要研究了堆积体溃口位置模拟^[22-23]、溃坝洪水模拟^[24]等。而对于

过程复杂、动态变化的滑坡—堰塞湖灾害链,还缺乏基于无人机应急测绘数据的普适、可靠、系统的灾情分析与险情模拟技术指标及实现路径。

2 面向滑坡—堰塞湖灾害链的灾情分析与险情模拟

无人机应急测绘数据是对灾情现状的表达,要对灾害进行准确分析评估,还必须收集到灾前已有的基础地理信息数据。从而,利用人机交互解译、数字地形分析等方法,对比分析灾前灾后影像(DOM)与地形地貌(DEM)变化,评估灾害损失情况,定量测算滑坡体、堰塞体和堰塞湖的基本特征参数,从而开展滑坡规模测算、灾害损失评估及次生灾害预判;采用三维仿真模拟、可视化表达等方法,模拟最佳的溃决溢流路径、影响范围及威胁对象等,进行自然溃决溢流危险及风险评价,制定最佳的抢险处置方案。

2.1 无人机应急测绘数据获取与处理

无人机遥感数据获取及处理主要包括航线设计、控制点测量、无人机航摄、数据预处理、自动空中三角测量、密集点云匹配以及纹理映射等环节(图1)。航线设计主要根据灾害发生的大致范围及其地形起伏情况,制定科学合理的无人机航摄路线。控制点测量可以通过现场实测,亦可通过在已有基础测绘成果上采集,较常用的方法是从已有的立体像对成果上选取控制点,我国部分省级测绘部门甚至建成了规模可观的像片控制测量点数据库,在应急状态下能大幅提升无人机航摄数据成果精度。目前,无人机航摄系统通常携带了高精度POS(Position Orientation System),并通过差分GPS技术,可获得高精度航摄影像数据。经自动剔片、匀光匀色等预处理,以及空中三角测量、密集点云匹配与纹理映射等过程,通过编辑、裁切等步骤,制作DOM、DEM以及三维模型等成果。

2.2 特征参数与灾情精准分析

滑坡—堰塞湖灾害链的主要组成要素是滑坡体、堰塞体和堰塞湖,构建其对应的特征参数指标体系,是进行灾情快速提取与精准分析的基础条件,见图2。在计算图2中的特征参数时,首先要准确解译出滑坡体、堰塞体和堰塞湖范围,然后利用DEM、DOM或三维模型进行量算。

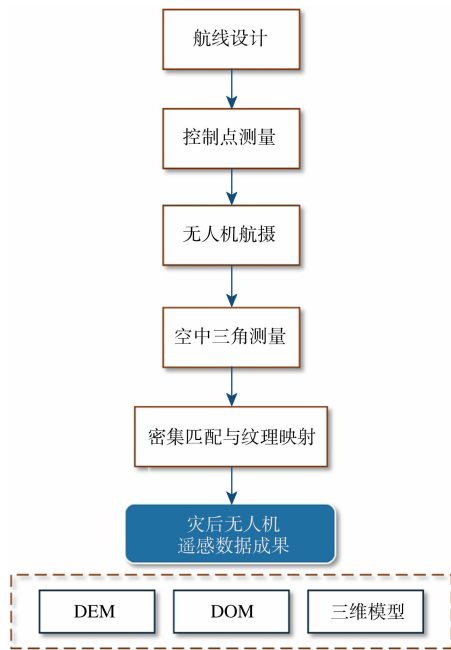


图 1 无人机应急测绘数据获取与处理
Fig. 1 Acquisition and processing based on UAV emergency mapping data

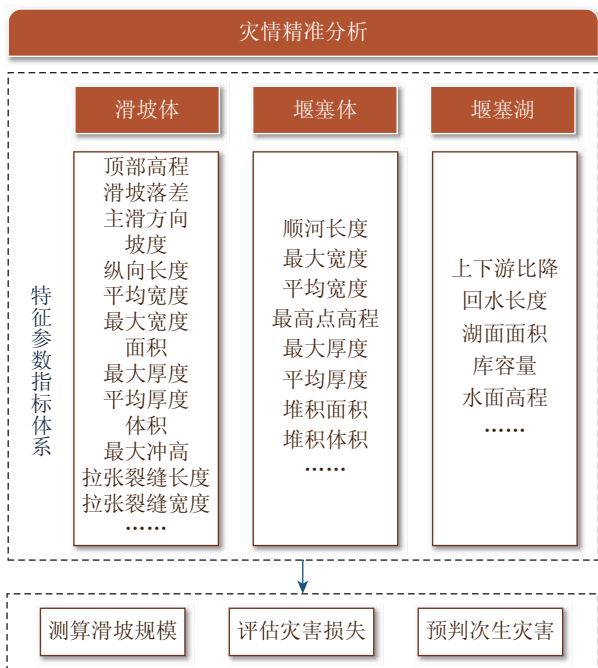


图 2 面向滑坡—堰塞湖灾害链的灾情精准分析
Fig. 2 Accurate analysis for landslide-barrier lake disaster situation

滑坡体特征参数指标包括:顶部高程、滑坡落差、主滑方向、坡度、纵向长度、平均宽度、最大宽度、面积、最大厚度、平均厚度、体积和最大冲高等。其中,顶部高程、滑坡落差、坡度、纵向长度、主滑方向、

平均宽度、最大宽度、面积和最大冲高等参数,可从三维模型上直接量取,或经过简单计算获得;在提取最大厚度、平均厚度、体积等参数时,假设滑动面与滑坡后裸露表面一致(实际情况略有差异,下同),利用灾前灾后 DEM 数据进行填挖方计算联合求取。

堰塞体特征参数指标包括:顺河长度、最大宽度、平均宽度、最高点高程、最大厚度、面积和体积等。除最大厚度与体积外,其余参数均可在三维模型上直接量取;最大堆积厚度与堆积体积,依然要利用灾前灾后 DEM 数据进行填挖方计算联合求取。

堰塞湖特征参数指标包括:上下游比降、回水长度、湖面面积、库容量、水面高程等。原始库容量从水利部门收集,通过比较灾后水位变化,并结合 DEM 数据进行库容量测算。其余参数可从三维模型上直接量算得到。

为了能准确评估灾害损失,还要对滑坡体、堰塞体及堰塞湖造成的重要基础设施(桥梁、道路等)、居民驻地、自然资源等损毁信息进行提取,且根据不同的灾情特点分析内容有所区别,目前已有大量的研究成果^[3,4,10-11],本文不再重点介绍。

在量化表征滑坡体、堰塞体与堰塞湖特征参数指标基础上,可开展滑坡规模测算、灾害损失评估以及次生灾害预判等工作。

2.3 溃决溢流关键参数与险情动态模拟

险情动态模拟主要包括自然溃决溢流可能性和抢险处置方案模拟两个方面。

自然溃决溢流可能性分析模拟,主要考虑自然溃决溢流高差、库容量、潜在不稳定斜坡稳定性和二次垮塌可能性等因素,并对自然溃决溢流对上下游造成的危害和风险进行分析,最终综合考虑确定自然溃决溢流可能性。

对于堰塞湖抢险处置方案模拟,主要考虑开挖泄洪、爆破和高压水冲等手段(图 3)。开挖泄洪要根据“危害和风险可控、损失尽量小”的原则,利用灾前灾后 DEM 数据,测算最佳开挖路径、开挖方量、最佳开挖断面等。在二次垮塌或落石风险较大,影响开挖实施的情况下,可考虑使用爆破方案,利用灾后 DEM 数据计算最低自然溢流高程点位,从而模拟选取爆破最佳区域。因滑坡堆积体是由较松散的物质组成,在条件允许的情况下,还可以考虑使用高压水冲方案,模拟滑坡堆积体在高压水冲作用下的最优处置方案。



图3 面向滑坡—堰塞湖灾害链的险情动态模拟

Fig. 3 Schematic diagram for simulation of landslide-barrier lake disaster

3 金沙江白格滑坡—堰塞湖灾害应急测绘保障实例

3.1 试验区概况

2018年10月11日和11月3日,在金沙江上游西藏自治区昌都市江达县波罗乡白格村与四川省白玉县绒盖乡则巴村交界处(98°41′57″E,31°4′56″N),

先后发生了两次大规模山体滑坡(以下简称“白格滑坡”)。滑坡阻断金沙江干流形成堰塞湖(图4),上游水位快速升高,库容量快速增大,对上下游村镇及基础设施造成了重大影响^[5,25]。特别是第二次滑坡—堰塞堵江,其泄洪所形成的洪峰经过巴塘县竹巴乡时,造成318国道金沙江大桥损毁严重,有7座桥面被完全冲毁,使318国道冲断。

从地质灾害应急响应分类来讲^[26],白格滑坡—堰塞湖灾害应急包括了“险情应急”和“灾情应急”两种类型。第一次滑坡应急测绘重点在于灾情应急,第二次滑坡应急测绘侧重于险情应急。在灾情应急情况下,应急测绘工作更侧重“快”;而在险情应急情况下,更加重视“准”。前者更关注宏观,后者更注重微观。

3.2 无人机应急测绘数据获取与处理

金沙江滑坡应急测绘保障主要开展了三次无人机航摄飞行,有关参数如表1所示。

| 表1 无人机航摄主要参数 | | | | | | |
|--|----------|----------|-------|-------|-----|--------|
| Tab. 1 Main parameters of UAV aerial photography | | | | | | |
| 获取时间 | 航摄平台 | 传感器 | 分辨率/m | 重叠度/% | | 数据量/Gb |
| | | | | 航向 | 旁向 | |
| 2018-10-12 | 飞马 F1000 | 索尼 a5100 | 0.05 | 80% | 60% | 1.39 |
| 2018-10-16 | 飞马 F1000 | 索尼 a5100 | 0.20 | 80% | 60% | 1.83 |
| 2018-11-05 | KY-001 | 索尼 a7 | 0.08 | 75% | 65% | 2.72 |

为保证航飞的数据精度,在起飞点架设了地面基站并获取白玉县连续运行参考站(Continuously

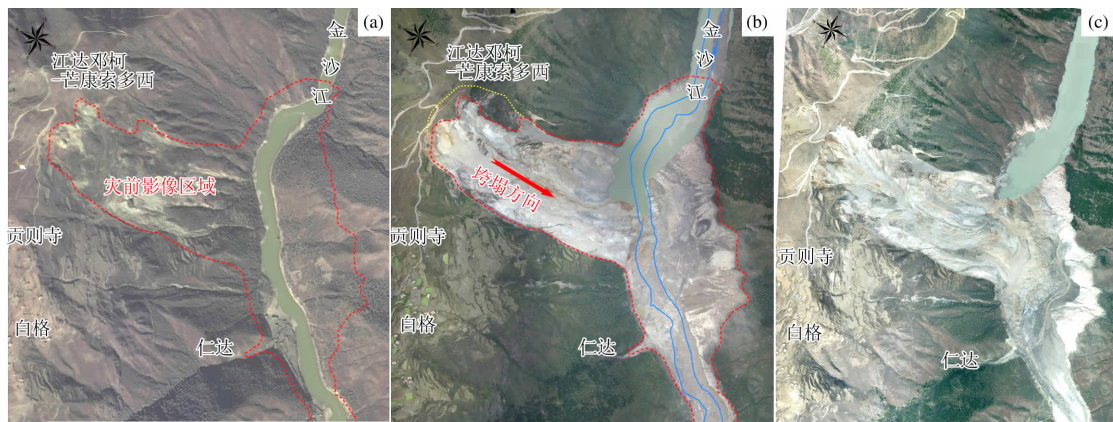


图4 灾前灾后遥感影像对比:

(a)2017年11月高分一号卫星影像;(b)2018年10月12日无人机影像;(c)2018年11月5日无人机影像

Fig. 4 Comparison of remote sensing images before and after disaster:(a) Gaofen-1 image taken on November, 2017;

(b)aerial image taken on October 12, 2018; (c) aerial image taken on November 5, 2018

Operating Reference Stations, CORS) 数据, 该 CORS 站离航飞起飞点直线距离约 10 km。

数据处理过程中, 采用后差分处理技术, 以提高 POS 数据的定位精度。影像数据处理采用飞马无人机管家处理系统, 从 1:50 000 地形图选取控制点参与计算, 并通过影像拼接、匀光匀色、正射纠正等步骤生成 DOM。利用 photomesh 软生成 DSM 数据(该区域植被稀疏, 且无建筑物影响, DSM 可直接当作 DEM) 和实景三维数据, 因滑坡区面积约为 0.3 km^2 , 在计算高程异常时采用常数值进行改正, 该常数提前在似大地水准面精化模型上求得。对灾前 1:50 000 基础测绘 DEM 成果(格网间距为 25 m)与三期灾后 DEM 数据(格网间距为 2 m)进行匹配, 整体匹配精度优于 2 m, 如图 5 所示的剖面线 A-A' 中的 A 与 A' 点良好贴合, 保证了各参数计算的准确性。

3.3 灾情分析

3.3.1 滑坡体基本特征。

首先, 利用人机交互解译方法, 判识出滑坡体、堰塞体和堰塞湖等边界, 获得刮铲区、运移区、堆积区、爬高区、拉裂缝、不稳定斜坡边界、堰塞湖边界等范围; 然后, 利用 GIS 空间统计分析、数字地形分析等方法, 实现对滑坡顶部高程、比降、坡度、宽度、长度、滑坡厚度、堆积厚度等参数的自动提取。利用 10 月 12 日灾后 DEM 数据进行量算, 得到第一次滑坡顶部高程约 3732 m, 滑坡落差约 850 m, 主滑方向 81° , 坡度 $29^\circ \sim 33^\circ$, 纵向长度约 1400 m, 最大宽度约 620 m, 平均宽度约 540 m, 面积 $52.6 \times 10^4 \text{ m}^2$, 最

大冲高 160 m。利用灾前 DEM 成果与灾后 DEM 数据(格网间距为 2 m), 通过差值及填挖方运算, 求得滑坡体最大厚度约 100 m, 平均厚度约 46 m, 体积约 $2450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

第二次滑坡主要集中在上次滑坡的中上部, 基本包含于第一次滑坡垮塌范围内。利用 11 月 5 日灾后 DEM 数据, 经量算, 滑坡顶部高程约 3720 m, 距水面落差约 850 m, 滑坡纵向长度约 900 m, 最大宽度约 360 m, 平均宽度约 300 m, 面积 $26 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。并通过与 10 月 16 日 DEM 数据进行差值及填挖方运算, 求得最大厚度约 85 m, 平均厚度约 33 m, 体积约 $850 \times 10^4 \text{ m}^3$ (未包含坡面残留堆积物约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$)。

3.3.2 堰塞湖基本特征。

从 10 月 12 日获得的 DOM 和 DEM, 与灾前基础地理信息成果进行对比分析可知, 第一次滑坡产生的松散物质在金沙江河道形成的堰塞体顺河长约 2100 m, 最大宽度 700 m, 平均宽度约 450 m, 堆积体最高点高程 3005 m, 堆积体下游尾端 2860 m, 最大厚度约 100 m, 平均厚度约 40 m, 堆积面积 $78 \times 10^4 \text{ m}^2$, 估算体积约 $3100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堰塞湖上下游比降(堰塞体) $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$, 截止无人机影像获取时(10 月 12 日 17 时), 堰塞湖回水长度 34 km, 湖面面积 7.7 km^2 , 库容约 $1.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中, 库容量根据收集的水文资料, 加上 1:50 000 基础测绘 DEM 成果测算堰塞回水区域增加的库容量得到。

通过 10 月 16 日和 11 月 5 日获得的 DOM 和 DEM 进行对比分析(图 6), 第二次滑坡在 10 月 12 日第一次堰塞体残留基础上, 新增堰塞体体积约

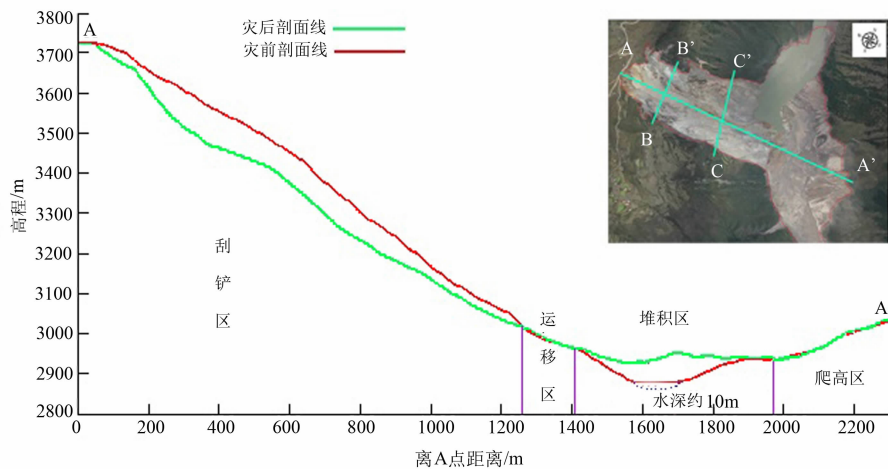


图 5 2018 年 10 月金沙江第一次滑坡纵向地形剖面图(A-A')

Fig. 5 Longitudinal profile (A-A') of the first Jinshajiang landslide in October 2018

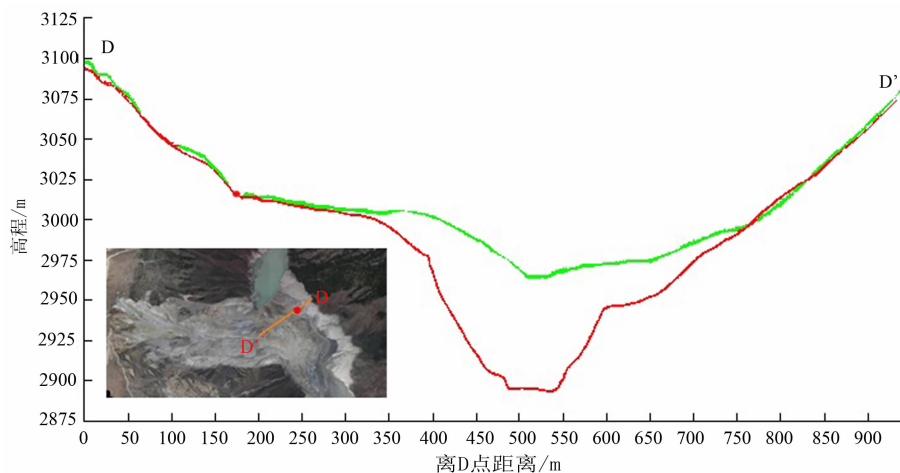


图6 2018年10月16日(红色)与11月5日(青色)堰塞体最高堆积区横向地形剖面对比图(D-D')

Fig. 6 Comparison of transverse topographic profile (D-D') of the highest accumulation area of the weir body at Baige landslide, October 16 (red) and November 5 (cyan), 2018

$1050 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堰塞体最大长度 2100 m, 最大宽度 700 m, 平均宽度约 450 m, 堆积体最高点高程 3011 m, 坝顶横断面最低点高程 2976 m (自然溢流高程), 堆积体最大厚度约 106 m, 平均厚度约 40 m, 堆积面积 $78 \times 10^4 \text{ m}^2$, 估算体积约 $3550 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据 2018 年 11 月 5 日 15:00 时影像和 DEM 数据, 堰塞湖水面高程约 2926 m, 自然溢流高差约 50 m, 估算堰塞湖总库容约 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.3.3 滑坡后缘及潜在不稳定斜坡特征。

通过 10 月 12 日灾后无人机影像数据解译发现, 滑坡后缘出现 2 条裂缝, 滑坡后缘和左侧存在 3 处不稳定坡体 (图 7)。深入解译发现, 滑坡体后缘出现的裂缝具有联通和扩展的趋势, P1 和 P2 不稳定坡体后缘具有较为明显的拉裂痕迹与变形, 成功预测了在外力作用下存在失稳破坏、形成二次垮塌的可能。

从 11 月 5 日无人机遥感影像上分析, 第二次滑坡并无大量新增裂缝, 仅在滑坡体后缘出现一处小型潜在不稳定体, 该不稳定体内发育约 30 条环形裂缝, 裂缝长度约 12 ~ 150 m, 裂缝宽度 0.1 ~ 2.0 m, 主要集中在 0.2 ~ 0.8 m, 其中最远裂缝距离第二次滑坡体的后缘约 50 m (图 8)。

3.4 堰塞体自然溃决溢流分析

第一次滑坡形成的堰塞湖于 10 日 12 时自然溢流, 并于 13 日基本达到出入库水量平衡, 险情得以解除。但第二次滑坡形成的堰塞体, 堆积高度高, 堰塞湖库容量大, 2018 年 10 月 12 日 17 时, 堰塞湖自

然溢流口高程为 2932 m, 库容约 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 另据 10 月 16 日无人机影像和 DEM 数据, 溢流槽长度 2100 m, 水面平均宽度 85 m, 最大宽度 109 m, 平均比降 4‰。此次堰塞湖自然溢流高程 2976 m, 估计总库容 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 自然溢流高程至新增堰塞体末端平均比降约 86‰, 至堆积体末端平均比降约 46‰。与上次自然溢流相比, 此次自然溢流由于高差大、总库容量巨大, 发生溃决洪水风险高, 可能严重危及下游居民、水电基础设施安全。

3.5 堰塞体抢险处置模拟

通过无人机持续监测, 11 月 7 日第二次滑坡形成的堰塞湖水位和蓄水量已超过 10 月 12 日自然溢流的指标, 综合堰塞湖水位、坝高和上游水流量分析, 估计 11 月 14 日左右形成自然溢流泄洪。由于坝顶自然溢流高程较高 (2976 m), 蓄水量大 (约 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$), 自然溢流泄洪洪水灾害风险远高于第一次。经专家会商, 为了避免渗流溃决和自然溢流泄洪洪水灾害, 亟需制定科学有效的堰塞湖应急处置方案, 力争在堰塞湖蓄水量 $3.5 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 范围内进行有效处置。

3.5.1 开挖泄洪模拟。

根据 11 月 5 日灾后无人机影像和 DEM 数据分析, 考虑原金沙江河道、第一次自然溢流道的河势, 以及堰塞体堆积地形和最小开挖方量, 优化制定开挖泄洪渠道方案。以堰塞坝坝顶自然溢流高程处为开挖泄洪口, 以此为基点沿河道上下游检索最低高程, 并通过三维模型确定最佳的开挖地形走向, 确定



图 7 滑坡后缘裂缝与潜在不稳定斜坡图

Fig.7 Fractures at the trailing edge and the potential unstable slope diagram at Baige landslide

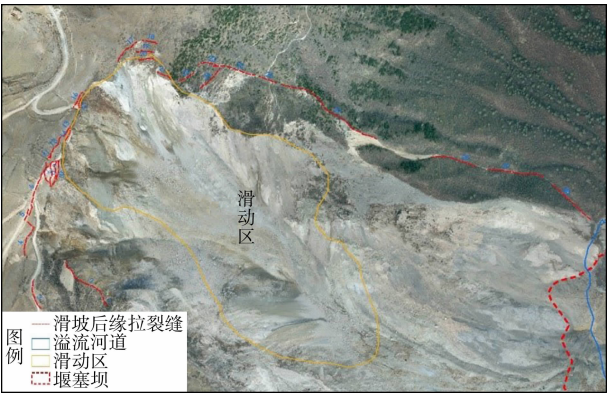


图 8 滑坡体后缘裂缝分布图

Fig.8 Distribution of fractures at the rear edge at Baige landslide

开挖泄洪渠道路径,再通过设定不同的开挖渠道底宽、顶宽、深度、坡度等参数,以自然溢流高程为基点,模拟估算坝体开挖方量(图 9、图 10、表 2)。

表 2 最优开挖泄流渠道开挖方量估算表

Tab.2 Estimation of optimal drainage channel excavation at Baige landslide

| 开挖渠道 底宽/m | 开挖渠道 顶宽/m | 开挖深 度/m | 溢流口 高程/m | 渠道坡 度/‰ | 挖方量/ 10 ⁴ m ³ |
|--------------|--------------|------------|-------------|------------|--|
| 60 | 100 | 20 | 2956 | 4 | 40 |
| 60 | 120 | 30 | 2946 | 4 | 85 |
| 60 | 140 | 40 | 2936 | 4 | 150 |

注:开挖深度以顶部最低高程点(2976 m)为基准

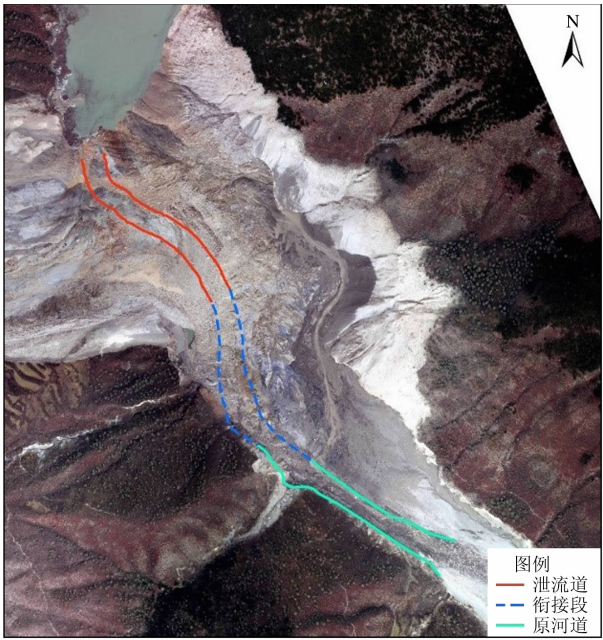


图 9 最优开挖泄流渠道平面布置图

Fig.9 Optimal layout of drainage channel at Baige landslide

3.5.2 爆破泄洪模拟。

在难以保障开挖方案现场施工人员安全的前提下,可考虑爆破,降低堰塞体堆积高程的方案(图 11)。

由于峡谷地形的约束,建议沿上下游方向定向爆破。同时,需要注意爆破对边坡的影响,防止次生灾害的发生。

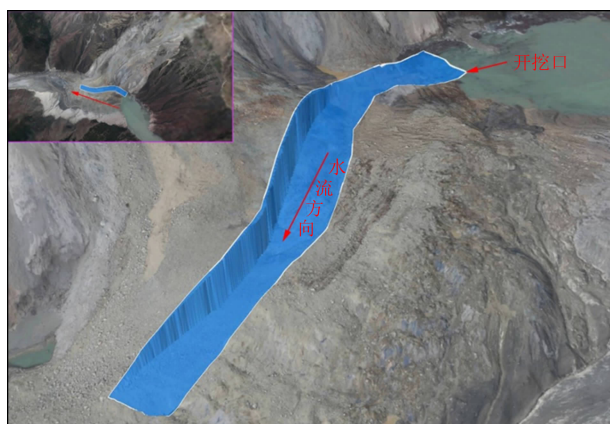


图 10 最优开挖泄流渠道立体图

Fig. 10 Three - dimensional diagram of the optimal excavated drainage channel at Baige landslide

最终,在经充分的评估论证,相关部门决定采取人工开挖导流槽的方式,主动降低坝体高度,降低洪涝灾害风险。

4 结论与展望

滑坡—堰塞湖灾害是我国西南峡谷山区破坏力极强的灾害类型,探讨无人机应急测绘数据应用于此类灾害的灾情分析与险情模拟,对于应急指挥决策具有重要的现实意义。

(1) 本文系统梳理了利用无人机应急测绘数据

提取滑坡体、堰塞体及堰塞湖特征参数的指标体系,以及溃决溢流关键参数,定量化开展滑坡—堰塞湖灾情分析与险情模拟,并利用 2018 年 10 月和 11 月两次金沙江白格滑坡—堰塞湖灾害无人机应急测绘为例,验证了其适用性与可行性。

(2) 本文提出了应急测绘向提供更加综合的诊断性和预测性专业化知识服务方向转变的思路,突破了常规应急测绘只提供单一、静态的描述性地图或影像成果的局限,提取蕴含于应急测绘第一手资料中的丰富知识,更好地支撑应急指挥与抢险救灾工作。

(3) 灾害应急指挥与抢险救灾工作涉及多种专业技术,尤其需要开展测绘与地质灾害防治技术融合研究,充分将专家知识转换为定量化决策依据。

下一步将加强特征参数自动提取研究,提高自动化智能化水平;另外,加强实时堰塞湖水面高程数据获取研究,可考虑设计一种浮于水面的 GPS 传感器,与无人机地面基站相连通,并通过无人机投递至堰塞湖,实时获取水面高程信息。

致谢 感谢中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所欧国强研究员和苏凤环副研究员以及泰瑞天际科技(北京)有限公司的支持。

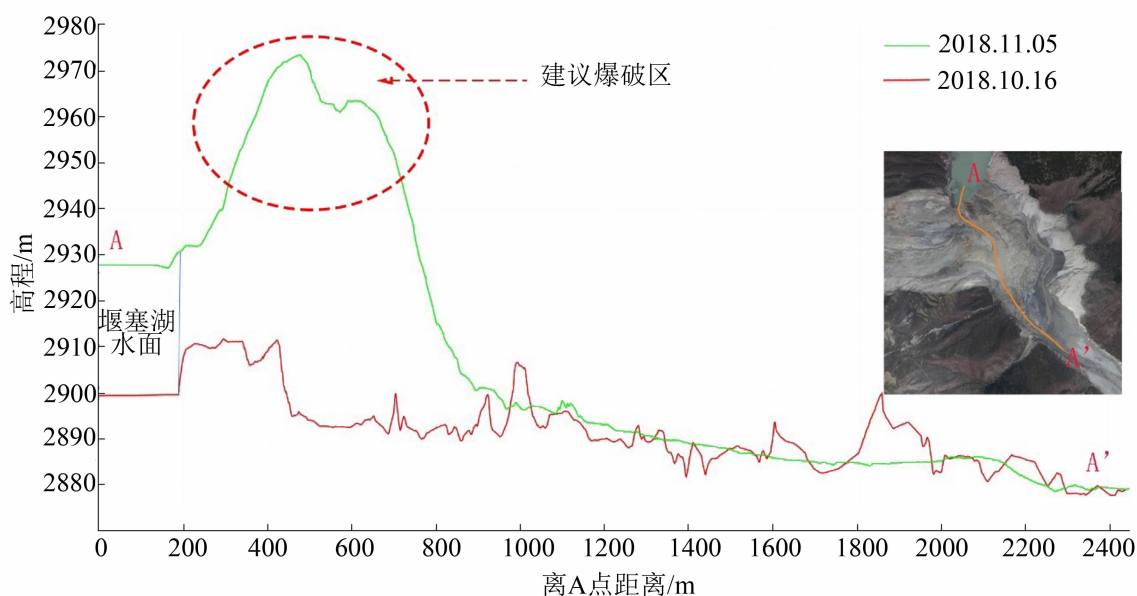


图 11 建议爆破区域示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the blasting area at Baige landslide

参考文献 (References)

- [1] 王立朝,温铭生,冯振,等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, **30**(1): 5-13. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, **30**(1): 5-13] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.01
- [2] 刘传正,陈红旗,韩冰,等. 重大地质灾害应急响应技术支持体系研究[J]. 地质通报, 2010, **29**(1): 147-156. [LIU Chuazheng, CHEN Hongqi, HAN Bing, et al. Technical support system of emergency response for serious geo-hazards [J]. Geological Bulletin of China, 2010, **29**(1): 147-156] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2010.01.017
- [3] 邓飞,窦爱霞,吴玮莹,等. 基于无人机遥感的四川九寨沟地震极灾区灾情快速调查[J]. 灾害学, 2018, **33**(3): 210-215. [DENG Fei, DOU Aixia, WU Weiying, et al. Rapid investigation of disaster situation in extreme disaster area of Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan based on UAV remote sensing [J]. Journal of Catastrophology, 2018, **33**(3): 210-215] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.039
- [4] 杨燕,杜甘霖,曹起铜. 无人机航测技术在地质灾害应急测绘中的研究与应用——以 9·28 丽水山体滑坡应急测绘为例[J]. 测绘通报, 2017(S1): 119-122. [YANG Yan, DU Ganlin, CAO Qitong. Application of UAV aerial surveying technology in geological disaster emergency mapping [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(S1): 119-122] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0632
- [5] 许强,郑光,李为乐,等. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(6): 1534-1551. [XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(6): 1534-1551] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-406
- [6] 黄海峰,林海玉,吕奕铭,等. 基于小型无人机遥感的单体地质灾害应急调查方法与实践[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(2): 447-454. [HUANG Haifeng, LIN Haiyu, LYU Yiming, et al. Micro unmanned aerial vehicle based remote sensing method and application for emergency survey of individual geohazard [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(2): 447-454] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.02.023
- [7] 朱庆,曹振宇,林琿,等. 应急测绘保障体系若干关键问题研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, **39**(5): 551-555. [ZHU Qing, CAO Zhenyu, LIN Hui, et al. Key technologies of emergency surveying and mapping service system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, **39**(5): 551-555] DOI: 10.13203/j.whugis20130351
- [8] 杨升. 汶川地震对建立测绘应急保障体系的启示[J]. 四川测绘, 2009, **32**(2): 51-53. [YANG Sheng. On the significance and urgency of establishing emergency surveying and mapping service system through Wenchuan Earthquake [J]. Surveying and Mapping of Sichuan, 2009, **32**(2): 51-53] DOI: 10.3969/j.issn.1674-5019.2009.02.001
- [9] 马洪超,姚春静,张生德. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨[J]. 遥感学报, 2008, **12**(6): 925-932. [MA Hongchao, YAO Chunjing, ZHANG Shengde. Some technical issues of airborne LIDAR system applied to Wenchuan Earthquake relief works [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, **12**(6): 925-932]
- [10] 李爱农,张正健,雷光斌,等. 四川芦山“4·20”强烈地震核心区灾损遥感快速调查与评估[J]. 自然灾害学报, 2013, **22**(6): 10-20. [LI Ainong, ZHANG Zhengjian, LEI Guangbin, et al. Rapid investigation and assessment of disaster in the core areas of Lushan “4.20” Earthquake in Sichuan using remote sensing data [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, **22**(6): 10-20] DOI: 10.13577/j.jnd.2003.0602
- [11] 唐尧,王立娟,马国超,等. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测[J]. 遥感学报, 2019, **23**(2): 252-261. [TANG Yao, WANG Lijuan, MA Guochao, et al. Emergency monitoring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites [J]. Journal of Remote Sensing, 2019, **23**(2): 252-261] DOI: 10.11834/jrs.20198405
- [12] 唐川,梁京涛. 汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 33-40. [TANG Chuan, LIANG Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan Earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008 [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 33-40]
- [13] 李维炼,朱军,胡亚,等. 面向多用户类型的泥石流应急灾害信息特征可视化方法[J]. 灾害学, 2018, **33**(2): 231-234. [LI Weilian, ZHU Jun, HU Ya, et al. Visualization method of characteristics of debris flow for multi-user under emergency state [J]. Journal of Catastrophology, 2018, **33**(2): 231-234] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.040
- [14] 吴迪军,孙海燕,黄全义,等. 河道洪水演进数值模拟及其在 GIS 平台上的可视化[J]. 测绘科学, 2009, **34**(6): 242-243, 189. [WU Dijun, SUN Haiyan, HUANG Quanyi, et al. Numerical simulation of flood routing in watercourse and its visualization on GIS platform [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, **34**(6): 242-243, 189]
- [15] 朱庆,韩会鹏,于杰,等. 应急测绘无人机资源多目标优化调度方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, **42**(11): 1608-1615. [ZHU Qing, HAN Huipeng, YU Jie, et al. Multi-objective optimization scheduling method for UAV resources in emergency surveying and mapping [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, **42**(11): 1608-1615] DOI: 10.13203/j.whugis20130000

- [16] TURNER D, LUCIEER A, DE JONG S M. Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**:1736 – 1757. DOI: 10.3390/rs70201736
- [17] 朱庆, 曾浩伟, 丁雨淋, 等. 重大滑坡隐患分析方法综述[J]. *测绘学报*, 2019, **48**(12): 1551 – 1561. [ZHU Qing, ZENG Haowei, DING Yulin, et al. A review of major potential landslide hazards analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, **48**(12): 1551 – 1561] DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019. 20190452
- [18] 朱庆, 李函侃, 曾浩伟, 等. 面向数字孪生川藏铁路的实体要素分类与编码研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*: 2020, **45**(9): 4 – 12. [ZHU Qing, LI Hankan, ZENG Haowei, et al. Classification and coding of entity features for digital twin Sichuan – Tibet railway [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45**(9): 4 – 12] DOI: 10.13203/j. whugis20200010
- [19] 陈天博, 胡卓玮, 魏铄, 等. 无人机遥感数据处理与滑坡信息提取[J]. *地球信息科学学报*, 2017, **19**(5): 692 – 701. [CHEN Tianbo, HU Zhuowei, WEI Lai, et al. Data processing and landslide information extraction based on UAV remote sensing [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, **19**(5): 692 – 701] DOI: 10.3724/SP. J. 1047. 2017. 00692
- [20] OUYANG Chaojun, AN Huicong, ZHOU Shu, et al. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China [J]. *Landslides*, 2019, **16**: 1397 – 1414. DOI: 10.1007/s10346 – 019 – 01177 – 9
- [21] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(11): 2612 – 2628. [XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocu landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and failure mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(11): 2612 – 2628] DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2017. 0855
- [22] NASH T, BELL D, DAVIES T, et al. Analysis of the formation and failure of Ram Creek landslide dam, South Island, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2010, **51**(3): 187 – 193. DOI: 10.1080/00288300 809509859
- [23] ZHAO G W, JIANG Y J, QIAO J P, et al. Numerical and experimental study on the formation mode of a landslide dam and its influence on dam breaching [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, **78**(4): 2519 – 2533. DOI: 10.1007/s10064 – 018 – 1255 – 0
- [24] 尹灵芝, 朱军, 王金宏, 等. GPU – CA 模型下的溃坝洪水演进实时模拟与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, **40**(8): 1123 – 1129, 1136. [YIN Lingzhi, ZHU Jun, WANG Jinhong, et al. Real-time simulation and analysis of dam-break flood routing based on GPU – CA model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, **40**(8): 1123 – 1129, 1136] DOI: 10.13203/j. whugis20140302
- [25] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, **51**(1): 9 – 16. [DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, **51**(1): 9 – 16] DOI: 10.15961/j. jsuese. 201801438
- [26] 刘传正. 重大突发地质灾害应急处置的基本问题[J]. *自然灾害学报*, 2006, **15**(3): 24 – 30. [LIU Chuanzheng. Basic problem on emergency disposition of abrupt heavy geological disaster [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, **15**(3): 24 – 30] DOI: 10.3969/j. issn. 1004 – 4574. 2006. 03. 005

Analysis and Simulation of Landslide-barrier Lake Disaster Based on UAV Emergency Mapping

LIU Fei^{1,2}, ZHU Qing^{1*}, DING Yulin¹, ZENG Haowei¹, SHE Jinxing², TAN Rongzhi^{3*}

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Surveying and Mapping Technology Service Center, Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geo-information, Chengdu 610081, China

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: UAV (Unmanned Aerial Vehicle) – based emergency surveying and mapping work was orientated to provide descriptive static map products in a timely manner, but it is difficult to effectively support the needs for accurate emergency decision-making against landslide-barrier lake disaster chains with complex processes and

dynamic changes. In this research, upon reviewing the applications of UAV emergency surveying and mapping in practices, an index system and technical approach to accurate analysis and dynamic simulation of landslide-barrier lake disasters was constructed according to the characteristics of landslide barrier lake disaster chains. It took the Baige landslide-barrier lake disaster occurring near the Jinsha River as an example to verify the feasibility and applicability of the proposed UAV emergency surveying and mapping support. Results show that: (1) The index system introduced in this paper systematically reflected the characteristic parameters of landslide-barrier lake disaster chain in the case study and exerted a principal role in quantitative disaster analysis and risk simulation. (2) It simulated all episodes of relief works, including excavation and draining, blasting, etc. for risk relief at the Baige landslide-barrier lake, nearly reproducing the natural overflow flushing in modelling; Then it offered an optimized excavation path and excavation volume for geohazard control. After evaluation and demonstration by experts, manual excavation of diversion channels was finally adopted to decrease the height of the lake dam in advance and eliminated the risk of flood disasters. (3) It is imperative for emergency surveying and mapping to provide more comprehensive diagnostic and specialized predictive knowledge services, and it needs to strengthen integration with related professional technologies, and better serve emergency control and disaster relief.

Key words: UAV; emergency surveying and mapping; Baige landslide; barrier lake