



基于“高分十”的金沙江滑坡灾情监测 与应用前景分析

唐尧^{1,2} 王立娟^{1,2} 马国超^{1,2} 贾虎军^{1,2}
李洪梁^{1,2} 尹恒^{1,2}

1 四川省安全科学技术研究院,四川 成都,610045

2 重大危险源测控四川省重点实验室,四川 成都,610045

摘要:基于“高分十”,探索以“高分十地质灾害”模式对10·11与11·3金沙江滑坡灾害开展灾情应急分析,利用灾害前后的高分遥感影像解译了滑坡灾害的基本灾情信息,分析了灾害前后孕灾及变形蠕动特征,对灾后白格堰塞湖及周边开展了隐患灾害排查,查明了堰塞湖两岸存在疑似裂缝与次生滑坡隐患点,开展了二次滑坡灾后灾区道路通达性分析。结果表明,“高分十”模式对类似金沙江滑坡等山区自然灾害巡排查、灾情跟踪监测及灾后应急抢险道路优选具有较大的应用前景。

关键词:“高分十”;金沙江滑坡;灾情监测;灾害应急分析;应用前景

中图分类号:P237;P694

文献标志码:A

2018-10-10 22:06,西藏昌都市江达县波罗乡与四川甘孜州白玉县交界处的波罗乡白格村境内金沙江段突发山体滑坡(简称金沙江滑坡),造成断流,形成堰塞湖(白格堰塞湖),之后自然泄流,但该滑坡在11-03 17:00左右发生二次滑坡,再次堵江断流,形成堰塞湖,两次滑坡位置相同。为了应对金沙江滑坡后的堰塞湖上下游灾情,西藏、四川与云南前后共动员数万人进行安置紧急转移,并对部分区域实行交通管制,直至滑坡堰塞湖灾情应急响应解除。

以高分2号等国产高分卫星影像为代表的高分辨率对地观测数据是国家的基础性和战略性资源^[1],是航天遥感领域践行军民融合技术发展、实现富国和强军的迫切需要。因此,将国产高分影像应用领域扩展至地质灾害监测与防控,尝试以“高分十地质灾害”模式,基于高分影像对金沙江滑坡等大规模突发地质灾害开展基本灾情信息获取与灾后次生地灾隐患排查分析,能够大力促进国产高分影像在地质灾害监测与防控领域的推广应用,满足国家及地方重大工程对高分遥感信息的迫切需求,推动高分遥感技术和军民技术深度

融合,为构建“天上看、地上查、网上管”的地质灾害应急防控体系提供强有力的数据图像支持^[2-3]。

1 高分遥感技术及“高分十”简述

高分遥感技术兼有空间分辨率高、相机数量多、遥感视场大、多载荷影像拼接融合应用等特点^[1,3]。随着高分卫星技术的不断进步,目前所获取的影像空间分辨率已经达到米级或更高级,具有响应时间短、直观形象、分辨率高、监测范围大的优点^[1],对助力于中国西部山区滑坡等灾害灾情监测、指导灾后应急抢险具有重要作用^[1-2]。

近年来,新兴遥感技术发展迅猛,国产遥感卫星也不断推陈出新,陆续发射了多颗高分辨率对地观测卫星,在民用领域主要有高分1号、高分2号、高分3号、北京1号、北京2号等^[1]。其中,国产高分2号卫星于2014-08-19发射成功,其全色波段空间分辨率达0.8 m,多光谱分辨率达3.2 m;北京2号卫星于2015-07-11发射升空,由3颗高分辨率卫星组成,空间分辨率为全色0.8 m、多光谱3.2 m,与高分2号类似,北京2号可提供覆盖

收稿日期:2019-03-03

项目资助:国防科工局高分专项(自治区)域产业化应用项目(87-Y40G06-9001-15/18);四川省绵阳市国防科工办军用技术再研发项目(zyf-2017-37);四川省科技厅重点研发项目(2018GZ0051,2019YFS0073)。

第一作者:唐尧,硕士,高级工程师,主要从事地质灾害遥感监测等应用研究。tangyao985@163.com

全球的空间和时间分辨率俱佳的遥感卫星数据和空间信息产品。国产遥感卫星的高分辨率对高山地区滑坡等地质灾害的灾区地物识别、灾情监测分析及灾后堰塞湖隐患调查具有重要作用。本文用到的国产遥感卫星主要为高分 2 号与北京 2 号卫星影像数据。

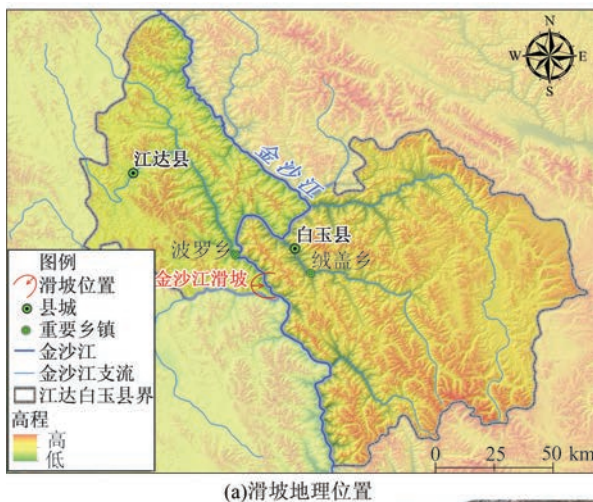
“高分+”是指以国产高分影像数据为核心,结合高分遥感卫星数据的特点和能力,利用国家高分专项领域既有的共性技术成果,有效集成行业与高分遥感应用的研究成果,整合产业链相关资源,融合北斗卫星导航、卫星通信、无人机及三维激光扫描等新兴技术,以高分遥感为基础建设面向地质灾害监测预警、安全生产防控监管、重特大灾害应急管理等行业领域的天空地一体化空间信息综合服务体系^[3-4]。本文主要将“高分+”理念引入滑坡灾害隐患调查、灾后灾情应急监测及应急抢险救援等领域,创造性地提出了“高分+地质灾害”与“高分+应急”等新兴概念与模式。

“高分+地质灾害”模式是指基于“高分+”,以高分遥感影像数据为核心,借助遥感技术在地质灾害专业调查领域的相关应用研究成果,利用滑坡等地质灾害发生前后在高分遥感影像上呈现不同的形状纹理等特征差异,结合无人机低空航摄等新兴遥感技术与地灾现场调研照片等资料,开展地质灾害监测对比、致灾演变分析、灾害成因探析及次生灾害隐患调查等,以此达到地质灾害灾情监测与隐患早期判识的目的^[5],同时为后续地质灾害预警提供信息支撑。“高分+应急”模式则是以高分遥感影像数据为核心,结合灾害发生后应急管理部门关心的灾情跟踪演化、次生隐患灾害判识及灾害应急抢险救援有关的机械设备和人员物质运输路径优选等问题,快速解译获取灾后道路通达性、隐患灾害位置规模及灾情规模演化趋势等关键信息,建立应急救援抢险后台支撑服务数据平台,更好地服务于应急管理等决策部门。

2 滑坡体概况及影像数据源

金沙江滑坡两次发生地均地处海拔 2 800 m 以上的高山无人区,西藏昌都市江达县南部的波罗乡、金沙江西岸距江达县城约 95 km,东与四川省白玉县隔江相望,行政上归属白格村,地理坐标为东经 98°42′30″,北纬 31°05′01″,位置如图 1(a)所示。省道 201 自滑坡区顶部通过,经波公村至波罗乡,通往西藏江达县城。滑坡发育形成区在地貌上属青藏高原高山地貌,浅层地表风化严重,

地质构造条件复杂^[6-7],滑坡顶部高程高、坡度大,为典型的高位山体滑坡灾害。本次滑坡为巨型山体崩落诱发的大型滑坡灾害,滑坡体在重力作用下高速向下运动,运动中解体并形成碎屑物质流,最终堆积体堵江断流,形成大型堰塞湖^[6-8]。滑坡灾害现场如图 1(b)所示。



(a)滑坡地理位置



(b)滑坡灾害现场照片

图 1 金沙江滑坡地理位置及灾害现场照片

Fig. 1 Geographical Map of the Jinsha River Landslide and Photos of Disaster Scene

金沙江滑坡属高位滑坡灾害,严重威胁着滑坡上下游金沙江两岸群众的生命财产安全,阻碍当地社会经济的可持续发展。高位滑坡灾害发生区常常人烟稀少、交通不便或沿江靠河,有时滑坡下部受流水经年累月剥蚀侵蚀呈悬空或半悬空状态,如上部遇地震、崩塌、连绵雨雪或开山采矿、修屋建桥、隧道爆破施工等自然环境或人类工程活动影响等^[1,3,7],极易诱发大规模地质灾害,轻则形成毁田断路、江中险滩,重则埋房伤人、堵江断流。

受客观具体条件(遥感数据易获得性、灾害降雨、灾区多云雾)的限制,数据源选取类型为滑坡后高分 2 号、滑坡前后北京 2 号卫星影像(见表 1)。结合滑坡灾区现场照片等资料(见图 2),开展滑坡灾后灾情应急监测、堰塞湖规模及隐患等分析与排查,对及时掌握滑坡灾后灾害致损情况,

指导灾后抢险救援、灾民撤离安置及灾后次生灾害隐患排查与预防具有重要作用^[1,8]。



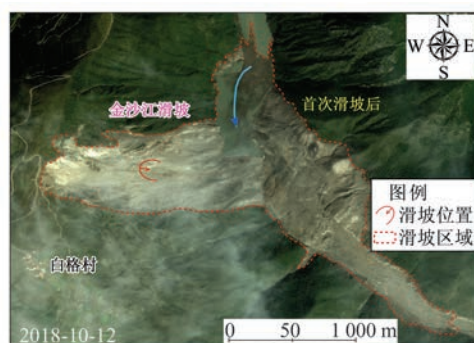
(a) 滑坡现场撤离照片



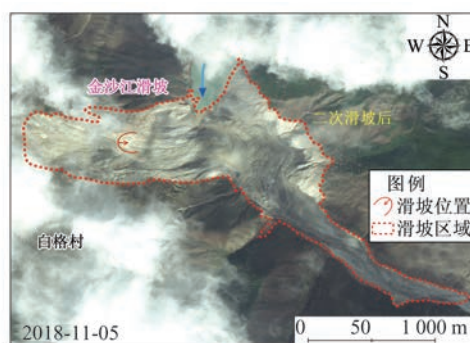
(b) 滑坡灾区安置照片

图2 金沙江滑坡现场撤离及安置照片

Fig. 2 Photographs of Evacuation and Resettlement of the Jinsha River Landslide



(a) 首次滑坡灾害对比图



(b) 二次滑坡灾害对比图

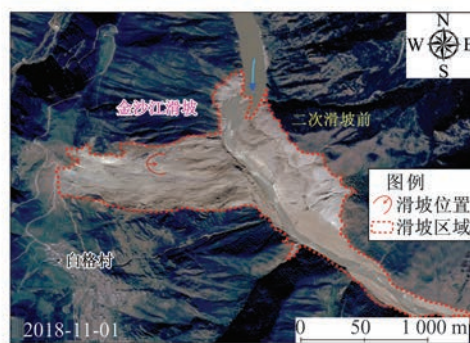
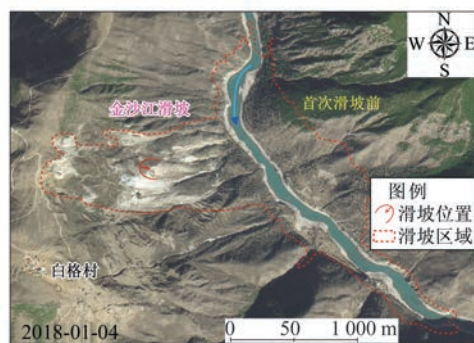


图3 金沙江滑坡灾前灾害对比图

Fig. 3 Comparison of Disasters Before the Jinsha River Landslide

表1 遥感数据基础信息

Tab. 1 Remote Sensing Data Basic Information

序号	数据类型	影像时相	影像序号	备注
1	高分2号	2018-10-12	3513706	首次滑坡后
2	高分2号	2018-11-01	3567585 3567586	二次滑坡前
3	北京2号	2018-01-04	D100150	首次滑坡前
4	北京2号	2018-10-12	D115447	首次滑坡后
5	北京2号	2018-11-05	D70VI_005	二次滑坡后

3 滑坡灾害监测对比分析

3.1 滑坡灾害前后对比及孕灾演变分析

第一时间了解滑坡灾害受灾区域灾情,对指导灾后救援意义重大。通过对两次滑坡灾前与灾后的遥感影像进行对比(见图3),开展滑坡致灾演变分析。金沙江首次滑坡的位置在灾前(2018-01-04)影像上呈现明显的白色色调、团絮状图斑区域,解译结果为山坡表面破碎堆积物源与滑移岩块堆积物,影像纹理特征明显区别于周边地物,表明该滑坡体在此之前已有前期征兆。二次滑坡区域在滑坡前(2018-11-01)的影像上的色调明显区别于周边地物,呈灰白-褐红色调,可以清晰看见自然道路、沟渠,且有浑浊河水流淌而过;二次滑坡后(2018-11-05)的影像上,始滑源区为滑坡后缘靠近公路处(公路已损坏不能通行),滑坡后物源又再次堵塞金沙江之前自然形成的导流沟道。

为深入分析滑坡灾害致灾规模等基本灾情信息,本文以高分遥感影像为底图,结合滑坡灾害在影像上的纹理特征及滑坡等地质灾害的空间形态等特征,采用“高分+地质灾害”模式,解译获取了金沙江首次滑坡的基本灾情信息,即滑坡体总体呈东-西向分布,滑区面积约 1.93 km^2 ,滑坡顶部高程约 $3\,703\text{ m}$,底部靠江处高程约 $2\,895\text{ m}$,最大高差超过 800 m ;滑动区最大水平滑距约 $1\,491\text{ m}$,平均坡度约 49.6° 。金沙江滑坡灾害后的巨大物源堵塞了金沙江,衍生了堰塞湖灾害,堵江长约 2.8 km ,淹没原江面面积约 0.22 km^2 。

深入解译首次滑坡的灾后影像发现,滑坡区大致分为3个区域,即滑动区、江水浸没区及堵塞河道区(见图4)。滑动区面积约 $799\,965\text{ m}^2$,为滑坡始发、物源形成及活动位移区;江水浸没区面积约 $257\,308\text{ m}^2$,系滑坡灾后碎屑物质堆积的地势较低区域,且已为江水所浸没;堵塞河道区面积约 $875\,046\text{ m}^2$,为滑坡巨大冲力将滑坡顶部、后壁等物源物质推入江中所覆盖的区域,也构成了灾后堰塞湖的堰塞体坝,现场调查堰塞坝土石比约 $7:3$,坝体冲高最大处约 150 m ,顺江长约 $1\,826\text{ m}$,横江最大宽度约 299 m ,预估堰塞体平均厚度约 40 m ,计方量约 $3\,500\text{ 万 m}^3$ 。

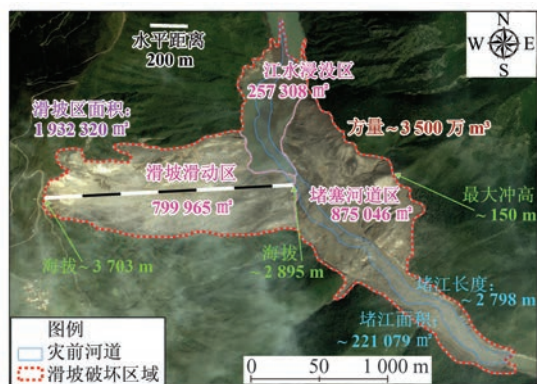


图4 金沙江首次滑坡监测特征分析

Fig. 4 Analysis of the Characteristics of the First Landslide Monitoring in the Jinsha River

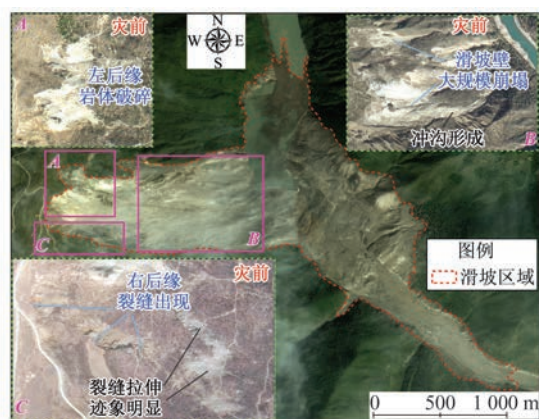
3.2 滑坡灾前蠕变特征分析

为深入分析滑坡灾前蠕变特征,选取首次滑坡灾前2018-01-04的影像对滑坡左后缘、右后缘、滑坡壁等滑坡部位开展重点解译论述。在灾前影像上,首次滑坡的位置附近见有明显的亮白色、团块状图斑,解译为山坡表面破碎物源堆积、岩块滑移物堆积现象,色调、纹理明显区别于周边地物,表明该滑坡体在发生前已有前期预兆^[9]。

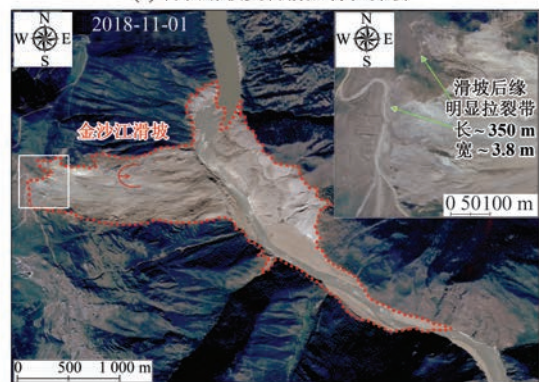
如图5(a)所示,A处为滑坡左后缘区,该区在灾前影像上见有明显的岩体破碎区,或为滑坡

前兆;C处为滑坡右后缘区,在灾前影像上见有裂缝出现,且裂缝的拉伸迹象明显,推测为滑坡经年压拉形成;B处为滑坡后壁下步区域,在灾前影像上见有两处规模较大的崩滑灾害及明显的冲沟,催生了滑坡形成。

分析二次滑坡前(2018-11-01)的山体蠕变遥感影像特征,发现在二次滑坡前的第2天,原滑坡后缘见有明显的拉裂带,长约 350 m ,宽约 3.8 m ,整个拉裂带呈“M”型弧状分布(见图5(b)),疑似二次滑坡灾前的明显形变迹象,或为滑坡灾前表征。倘若能及时掌握此类滑坡的前兆现象,对附近山体进行监测、预警,提前采取干预措施,那么此次滑坡及次生堰塞湖危机的风险点或许能被更早地堵住,开挖泄流可能更早开展,下游致灾损失就能小些。



(a) 首次滑坡灾害前后特征分析



(b) 二次滑坡灾害前后特征分析

图5 金沙江两次滑坡灾害前后滑坡特征分析图

Fig. 5 Analysis of Landslide Characteristics Before and After Two Landslide Disasters of the Jinsha River

通过对二次滑坡灾后(2018-11-05)的遥感影像进行解译分析可知,滑坡新形成的堰塞湖坝体面积约 $473\,952\text{ m}^2$,估算方量约 500 万 m^3 ,滑坡新形成的堰塞湖湖面宽约 549 m ,坝体顺河长约 $1\,078\text{ m}$,坝体距下游地势低洼面最短距离约 440 m ,且在低洼面零星见有积水潭3处(见图6),疑似二次滑坡形成过程中推压原河道积水所致,

这几处水塘的存在对二次滑坡后形成的堰塞湖坝体上部形成了倾覆压力,对堰塞坝体的稳定性构成了潜在的威胁隐患。

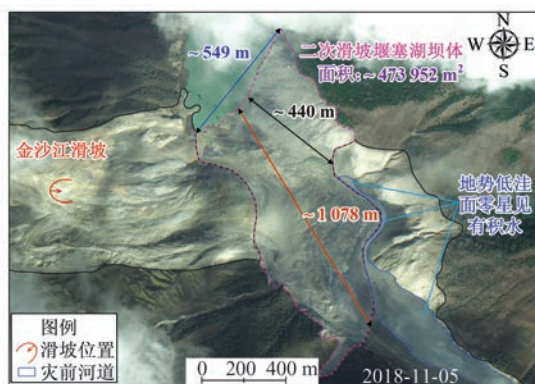


图6 金沙江二次滑坡后遥感综合分析

Fig. 6 Analysis of Remote Sensing Characteristics of the Second Jinsha River Landslide

4 滑坡成因初步分析

对滑坡灾害的发生原因、运动机理、堆积特征等进行全面、细致的调查,第一时间获取了宝贵的数据资料^[2,6],为后续预判灾害发展趋势与指导应急抢险预案提供了重要的决策依据。金沙江两次滑坡始发区为滑坡后缘靠公路地带,该地属深切峡谷偏远地区^[6-7],唯一进入现场的乡道公路由于堰塞湖水位上涨,遭受冲刷和浸泡而断道。

结合滑坡堰塞坝体和后缘的实地调查,开展滑坡成因初步分析。滑坡区受断裂构造、地震、长期重力、冻融膨胀与大气降雨等因素的综合作用,

诱发的地质灾害具有滑坡-碎屑流-堰塞湖的复合性灾害链,且呈现多期活动的成灾特征^[6-8],属于高位、高剪出口、高速远程基岩滑坡^[6-7,10]。滑坡始发区地处高山峡谷区域,剪出口处高程约为2 950 m,平均坡度为35°~50°,滑动面形态总体上为非完整的楔形体(舌形);滑坡存在两个主滑方向,剪出口处滑动方向偏向上游;现有的滑坡堰塞坝为两次滑坡堆积的结果;四川白玉县一侧的光滑面为滑坡堆积体或滑坡激起的水砂射流在表面冲刷的结果,不存在任何滑坡现象;滑坡在空间上大致可以划分为3个区,即顶部的牵引区、中部的主滑区、下部的阻滑区^[6,8,10](见图7);由于强烈的碰撞作用,滑坡堆积体整体上较为破碎,仅靠近上游侧表部存在较大的大理岩块。滑坡堆积体结构密实,以不同尺寸和颜色的大理岩与细颗粒沙土成分为主,土石比约7:3;堰塞坝体下游侧存在次级滑坡迹象等。另外,在滑坡后缘及左右两侧存在3处裂缝区(裂缝区2、裂缝区3的裂缝迹象较明显),裂缝区2位于滑坡后缘,影像上见有明显的裂缝开裂,裂缝带大致沿原公路展布;裂缝区3位于滑坡后部右侧,裂缝带大致呈“几”字状,裂缝区地势高、体量大、势能高,孕灾致灾可能性较大^[8,10],加之裂缝区表面岩体破碎且见有横向及放射状次级小裂缝,疑有再次滑移前期征兆,建议重点做好该区的综合监测预警工作。

到2018-11-13下午,白格堰塞湖坝体右岸已完全冲开,堰前水位下降20余米,出入库水量已基本达到平衡,江水流通顺畅^[9],据当时迹象推

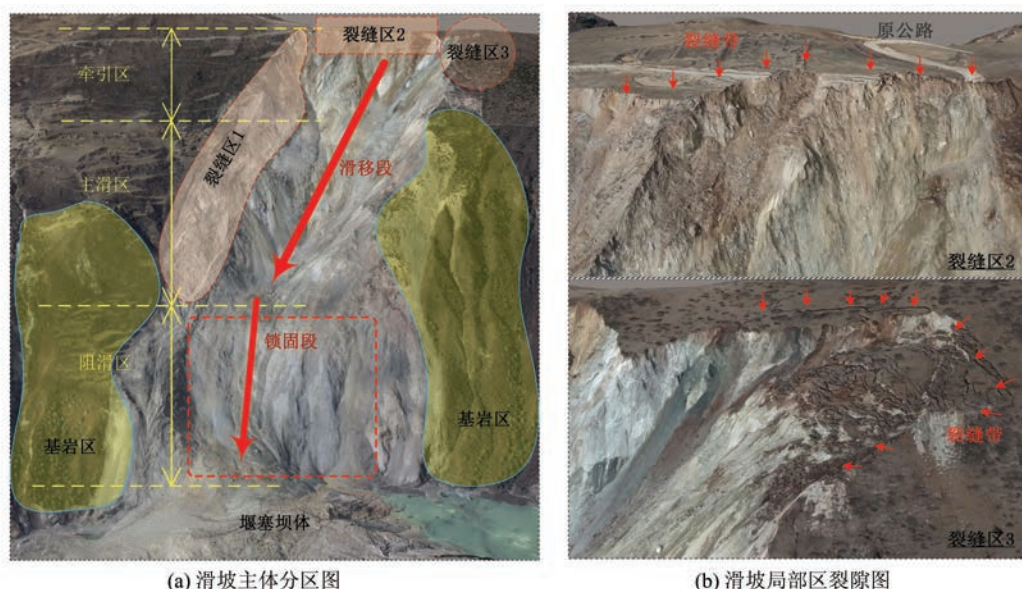


图7 金沙江滑坡滑动分区分析图(背景为2018-11-05无人机拍摄照片)

Fig. 7 Schematic Diagram of Sliding Zonal Analysis of the Jinsha River Landslide

(Photo Taken by the UAV on November 5, 2018)

测,白格堰塞湖出现溃坝的可能性已不大,之后最重要的工作是,一方面要密切掌握堰塞湖泄流监测变化,督促下游各地切实抓好防汛工作,保障沿江两岸人民的生命财产安全;另一方面要加强与西藏方面的信息共享工作,共同对滑坡侧山体进行详细的地质联合调查。

5 灾后堰塞湖全域隐患灾害调查分析

金沙江滑坡体量大,主河道被堵断流,白格堰塞湖形成。伴随上游来水不断汇集,堰塞湖水位上涨迅猛,淹没沿江公路及两岸居民房屋、草场、耕地等,严重危及沿江附近部分村寨的生命财产安全。

5.1 首次滑坡堰塞湖淹没区受灾分析

滑坡堰塞湖形成后,及时获取堰塞湖淹没受灾信息,对指导灾后应急抢险救援具有重要作用。本节以高分遥感影像为底图,综合采用“高分+应急”模式,快速准确地获取堰塞湖淹没区受灾情况。

本次共解译出 5 处淹没区(受灾区),受灾对象主要为区内房屋、耕地、桥梁及公路等(见图 8 及表 2)。这为应急管理部门及时掌握淹没受灾情况、制定应急抢险预案与调拨应急救援物资提供了重要的决策支持数据。

表 2 首次滑坡堰塞湖淹没受灾区信息
Tab.2 Inundated Disaster Area Information of the Dammed Lake of the First Landslide

受灾区	受灾体类型	淹没受灾情况
A	桥梁、房屋、耕地、公路	桥梁 1 座;房屋 3 户,面积 10 039 m ² ;耕地 3 处,面积 169 313 m ²
B	房屋、耕地、公路	房屋 4 户,面积 3 269 m ² ;耕地 2 处,面积 91 749 m ²
C	房屋、耕地、公路	房屋 8 户,面积 4 484 m ² ;耕地 4 处,面积 86 652.91 m ²
D	房屋、耕地、公路	房屋 5 户,面积 4 538 m ² ;耕地 3 处,面积 63 798 m ²
E	房屋、耕地、公路	房屋 2 户,面积 1 977 m ² ;耕地 2 处,面积 22 002 m ²

5.2 首次滑坡堰塞湖堰塞体周边隐患调查

以高分遥感影像为底图,综合采用“高分+应急”模式,及时开展堰塞湖堰塞体周边隐患调查,协助应急管理部门消除或降低隐患造成的潜在损失^[4,11]。

本文基于首次滑坡后的高分影像,结合裂缝在影像上的纹理特征及部分现场反馈照片等资料,快速解译出了 4 处新的疑似裂缝(见图 9 中 L_1 、 L_2 、 L_3 及 L_4),及时提供给应急管理等相关部



图 8 金沙江首次滑坡淹没区分析
Fig. 8 Analysis of the Inundated Area of the First Jinsha River Landslide

展约 120 m 及 380 余米,裂缝宽度在影像上尚不能准确判译,但据现场消防人员的反馈信息,表明该处裂缝宽约 50 cm。另两处裂缝分布在滑坡左下部(L_2)及中部(L_3),在影像上呈浅灰色色调、脉状纹理,影像特征较为明显,长度均超过 300 m,分别为 370 m 及 500 m;裂缝 L_4 位于现有滑坡边缘北侧,长度约 126 m,在影像上见有明显的后缘拉伸(亮白色色调),两侧隐约见有冲沟,再次滑坡的征兆迹象明显。

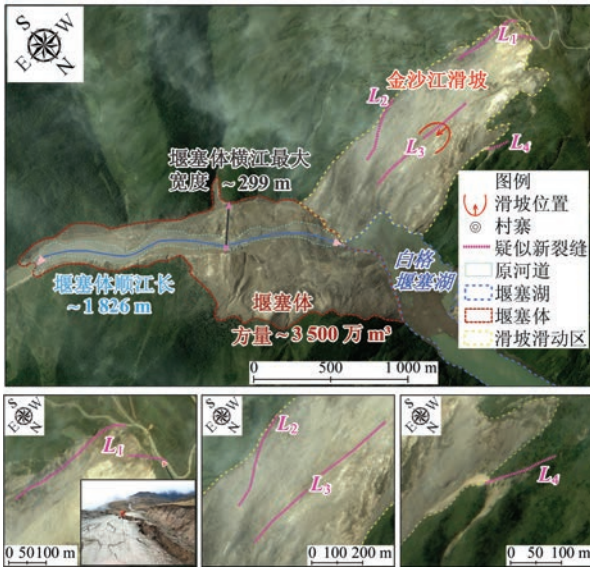


图 9 白格堰塞湖壅口底部隐患调查分析图
Fig. 9 Investigation and Analysis of Hidden Dangers at the Bottom of the Mouth of the Baige Dammed Lake

5.3 首次滑坡灾后堰塞湖湖面淹没区周边隐患调查

通过遥感解译,截至 2018-10-12 12:26(灾后影像获取时间),堰塞湖湖面面积约 6 163 901 m²(堰塞湖面自坝体江水浸没区起,直至波罗乡上

游,长约 21.4 km,即图 10 中蓝色虚线区域),预估湖水平均深度为 47 m(现场传回资料数据),估算堰塞湖蓄水量约 2.9 亿 m^3 ;堰塞湖坝体东岸高、西岸低,从西向东呈阶梯级延伸约 2 km,堰塞体横河最大宽约 299 m,顺河长约 1 826 m,面积为 875 046 m^2 ,最大冲高达 150 m,估算堰塞体平均厚度约 40 m,计方量约 3 500 万 m^3 。在遥感影像上堰塞湖宛如一条水龙,由西北向东南延伸,堰塞体则为龙头位置。

首次滑坡后形成的堰塞湖,水面持续上涨势必破坏湖面原有的稳定应力场,产生次级滑坡等地质灾害,需对堰塞湖淹没区周边开展地质灾害隐患调查。本节以高分遥感影像为基础,结合地质灾害在影像上的纹理特征及地质灾害空间形态等特征^[1,11-12],采用“高分+地质灾害”模式,完成了白格堰塞湖淹没区周边隐患地灾点调查,共解译出 7 处疑似隐患灾害点(见图 10 中 A~G),地灾点信息见表 3。其中,规模较大、稳定性差、危害性大及灾害易发性高的隐患点主要为 C、D、

E、F 这 4 处。C 处隐患点位于湖面拐角处,分左右两翼,顶部岩层破碎痕迹明显、地势高、物源量大;D 处隐患点分布在 C 处下游,分为 d_1 、 d_2 、 d_3 3 部分,在所有隐患点中规模最大,后部见有明显的冲沟,地表变形肉眼可见,有通往波罗乡的乡村公路邓索线横穿而过,受人类活动影响大,极易发生二次灾害,后期应重点对其开展灾害监测;E、F 两处隐患点影纹特征类似,均有白色色调的裸露岩块堆积,位移迹象明显,且均有公路穿过,规模较大,若堰塞湖面水位继续抬升,势必加大两处隐患点灾害发生的可能,建议后期将其纳入重点地质灾害监测工作范围,加强监测监管;A 处隐患点位于波罗乡政府对岸的两江汇合处上方,下方有公路及民居分布;B 处隐患点位于湖面东岸山地处,地表破碎,地势较高;G 处隐患点紧靠滑坡浸没区西岸,规模较小、物源量不大,但其位于堰塞湖拐角壶口处,一旦发生二次滑坡,将加大本次滑坡物源,且可能堵塞湖面壶口,造成二次堵江,因此也应对其开展定期监测。

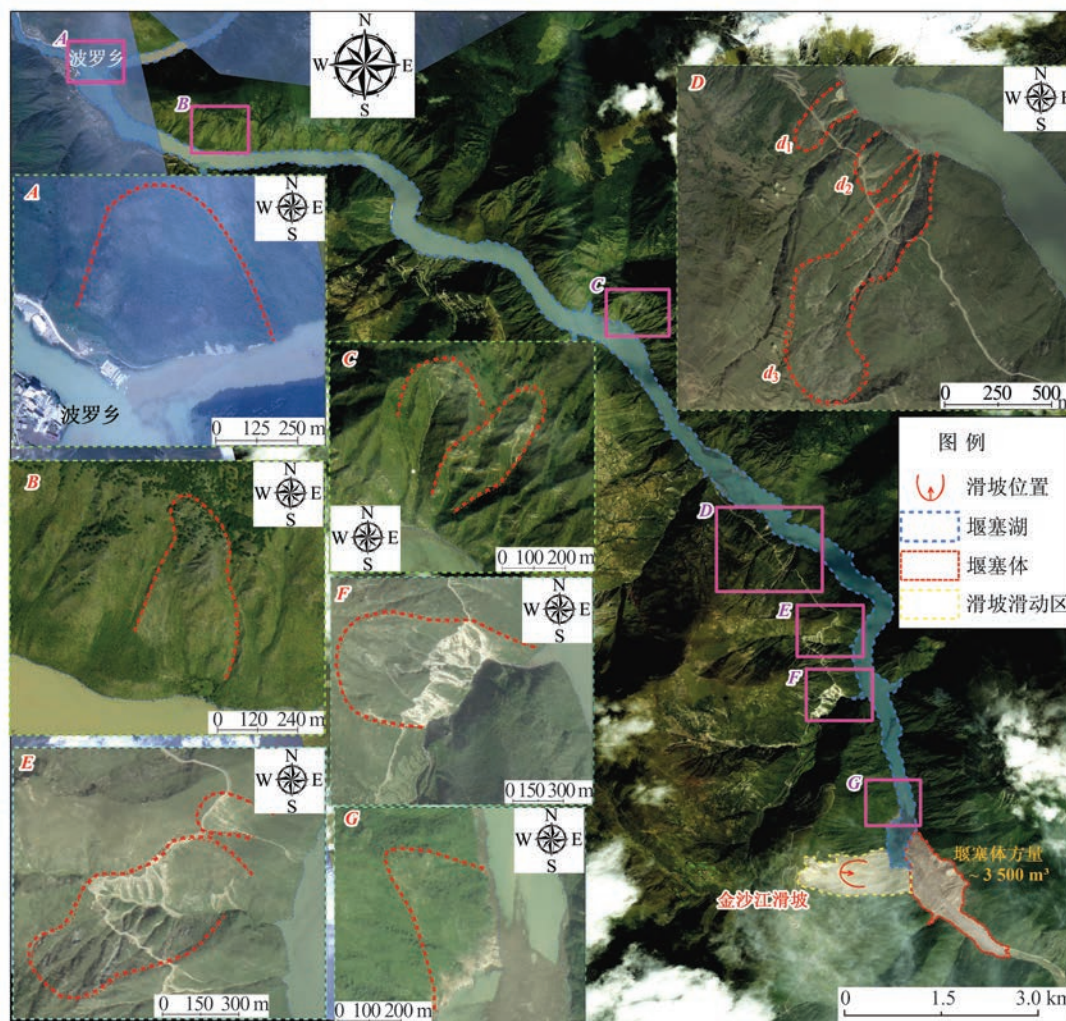


图 10 白格堰塞湖及淹没区周边隐患点解译图

Fig. 10 Remote Sensing Interpretation of Hidden Danger Points Around the Baige Dammed Lake and Inundated Area

表 3 堰塞湖淹没区周边遥感解译疑似隐患地灾点信息

Tab. 3 Remote Sensing Interpretation of Suspected Hidden Dangers in the Surrounding Area of the Inundated Area of the Dammed Lake

隐患点	地理位置	隐患点类型	遥感影像特征
A	98.601°E,31.198°N	滑坡	位于山体腰部,具有明显的浅色纹理,呈长舌状,发育区或坡体上多有深色方形条带、线状等深色阴影纹理,坡体两侧多有冲沟发育。
B	98.618°E,31.186°N	崩塌+滑坡	有较明显的形变影像特征,呈条带状的深色阴影,横向深色皱纹状的线状纹理等,呈现高海拔山区和艰险地势的植被稀疏错落特征。
C	98.674°E,31.163°N	崩塌	位于山体腰部以上区域,其形态较为孤立明显,隐患体呈独立、微小的凸形地貌,坡体上植被较为稀疏杂乱。
D	98.693°E,31.123°N	崩塌+滑坡	位于山脊区域,壁面高陡,多有深色条带的阴影分布,其中或有呈点状或斑状的浅色纹理,具有较为明显的粗糙感,顶部区域可见深色的线状纹理(裂缝发育),下部呈有凸形地貌,植被稀疏,后部见有明显冲沟。
E	98.701°E,31.115°N	崩塌	影像上具有连续条带状的深色阴影和横向皱纹状纹理,表面凹凸不平,下部见有白色色调裸露岩块堆积,位移迹象明显。
F	98.699°E,31.108°N	滑坡+崩塌	上部滑坡色调较暗,呈箕形、舌形等形态,有纵长式梯形形态,见有滑坡壁、滑坡台阶;下部崩塌呈亮白色,有连续或断续条块状,见有明显的碎石堆积体或者巨石阴影。
G	98.710°E,31.093°N	滑坡	灰白、浅黄色调,呈现舌形形态特征,后部色调较浅,两侧见有沟壑。

5.4 二次滑坡灾后灾区道路通达性分析

金沙江二次滑坡灾后再次形成白格堰塞湖,导致波罗乡到白格村道路因堰塞湖水位上涨而被淹没、损毁,无道路通行。因此,及时掌握灾后灾区道路路径信息,开展通达性分析,建立基础地理信息数据库,这对指导灾区灾后应急抢险救援与可能的受伤人员外运医治提供了重要的决策依据。

本节对灾后道路通达性分析主要是基于二次滑坡后的白格堰塞湖区域高分影像地图,及时解译获取了通往堰塞湖坝体及滑坡顶底部周边的重要道路,包括省道、国道、县道及部分宽度在 4 m 左右的乡村等级道路,同时在所解译的道路网中应特别注意分析道路是否存在损毁、淹没等影响车辆通行的因素,优选救援抢险车辆及人员可快速抵达堰塞湖坝体的交通路线,最终共优选出两条通达性较好的路线可通往坝体灾区(见图 11)。其中一条为从上游由江达县城或白玉县城方向经省道 201 抵达波罗乡政府驻地北岸(政府驻地已被堰塞湖水淹没),之后经堰塞湖湖面水路直到堰塞坝体,路线长约 22 km;另一条为从下游由陆路抵达,该路线部分路段原为下游的优巴村至则学村乡村通行便道,路况较差,另有部分路段为干涸河道,路线长约 10 km。后续堰塞湖实际抢险过程表明,灾后堰塞湖排险机械、人员及物资的运输多由这两条路线抵达,因此道路通达性分析对灾

后应急救灾抢险具有重要作用。

6 结 语

金沙江两次滑坡体量均较大,两次都将主河道堵江断流,形成堰塞湖,危及沿江公路及两岸居民的生命财产安全。本文基于“高分+”,以“高分+地质灾害”、“高分+应急”模式开展滑坡灾后灾情应急监测,分析了滑坡孕灾形变蠕动特征与灾后灾区道路的通达性,排查了堰塞湖及周边疑似裂缝与次生滑坡隐患点,主要取得以下结论:

1)以高分遥感技术为基础,采用“高分+地质灾害”模式,解译完成了金沙江滑坡灾害的基本灾情信息,结果表明本次滑坡区面积约 1.93 km²,最大高差约 808 m,最大水平滑动距离约 1.49 km,整体坡度落差约 49.6°;灾后堰塞体横河最大宽约 299 m,顺河长约 1 826 m,面积为 875 046 m²,最大冲高达 150 m,估算堰塞体平均厚度约 40 m,方量约 3 500 万 m³;解译发现堰塞湖周边有 7 处疑似隐患地灾点。

2)利用滑坡灾前灾后影像,采用“高分+应急”模式,对灾后白格堰塞湖周边开展隐患灾害排查,查明了堰塞湖周边疑似裂缝灾害 4 处;滑坡致灾结果为摧毁桥梁 1 座、冲毁公路约 14 km,累计受灾民居 22 户,毁坏房屋 24 308 m²,淹没耕地 433 516 m²;分析了二次滑坡灾后的灾区道路通



图 11 金沙江二次滑坡后灾区道路通达性分析图

Fig. 11 Schematic Diagram of Road Accessibility Analysis in the Disaster Area After the Second Landslide in the Jinsha River

达性,优选两条路线可供救援抢险车辆及人员快速抵达堰塞坝体。

3)以金沙江滑坡、四川茂县滑坡、贵州纳雍滑坡等为代表的高位地质灾害广泛存在于中国西部山地区域,金沙江滑坡后表现出的高效率抢险救灾固然值得称道,但高效抢险救灾也意味着高成本、高风险,与其被动接受地质灾害发生,花费巨额资金治理,不如集中资金开展地质灾害调查、建设监测预警系统,实现提前发现并预测风险,达到地质灾害治早治小、风险能控、节约投资的效果,做到变被动治灾为主动防灾。利用高分影像对地灾高发易发区进行地质灾害隐患遥感普查,可提前发现滑坡的变形迹象,识别出滑坡的潜在隐患(堰塞湖、二次滑坡),对该滑坡实施监测预警和风险评估,便可掌握防灾减灾的主动权,变事后应急救援为事前主动防灾。

4)建议建立高分应急保障机制,满足常态(一般灾害事件)与非常态(重特大灾害事件)情况下的地质灾害应急保障服务需求;梳理国产高分应用和产业脉络,打造纵(地方分中心)横(行业分中心)结合的地质灾害防控产业高分应用新体系,打通高分数据获取、处理和应用服务的上下游产业应用渠道,促进高分产业发展;加强应急管理、自然资源、生态环境等行业支撑单位联动,提供准确高效的地灾应急救援救援辅助决策指标数据;同

时结合国产北斗导航系统,探索建立“高分+北斗+地质灾害+应急抢险救援”的地质灾害灾前调查、灾时变形监测、灾后灾情监测及灾后应急抢险救援的国产高分应用新模式。

5)习近平总书记在2018-10的中央财经委员会第三次会议上发表“建立高效科学的自然灾害防治体系,提高全社会自然灾害防治能力,为保护人民群众生命财产安全和国家安全提供有力保障”的重要讲话,强调加强地质灾害隐患排查与监测的重要性。但金沙江滑坡灾害的发生给研究者暴露出一个短板,即传统的地质灾害隐患巡排查及地面调查手段已严重滞后,难以满足类似金沙江滑坡这种地势高、落差大、规模大的地质灾害灾后应急监测需求,当前亟需一套适用于山区地质灾害隐患排查及应急监测的新技术理论体系。而国产高分光学数据虽受云雾降雨等影响,对天气依赖性较高,但随着后续国产高分3号等雷达卫星数据的推广和后续国产光学与雷达影像数据的综合使用,必将为山区地质灾害灾后灾情监测与灾前隐患排查、孕灾病变过程监测注入新的活力,可以预见未来数年内,新兴遥感技术(光学与雷达遥感结合)将在类似金沙江滑坡等山区地灾巡排查与灾情监控中发挥更大的作用。

致谢:感谢高分辨率对地观测系统四川数据与应用中心提供的高分卫星数据。

参 考 文 献

- [1] Tang Yao, Wang Lijuan, Ma Guochao, et al. Application of UAV and Domestic High Scoring Technique in “6·24” Maoxian Landslide Emergency Monitoring[J]. *Land and Resources Information*, 2017(8):14-19(唐尧,王立娟,马国超,等.无人机与国产高分技术在“6·24”茂县滑坡灾情应急监测中的应用[J].国土资源情报,2017(8):14-19)
- [2] Tang Yao. Shenzhen “12·20” Landslide Disaster Causes and Security Measures Analysis[J]. *Land and Resources Information*, 2016(1):39-43(唐尧.深圳“12·20”山体滑坡灾害成因及安全防范分析[J].国土资源情报,2016(1):39-43)
- [3] Yu Shuchen. Research on Construction of Remote Sensing Emergency System for Geological Disasters in Hunan Province[J]. *Land and Resources Information*, 2017(4):46-51(余姝辰.湖南省地质灾害遥感应急体系建设研究[J].国土资源情报,2017(4):46-51)
- [4] Tang Yao, Wang Lijuan, Ma Guochao, et al. “Red Line” Extraction and Danger Analysis of Mine Tailings Based on “GF+”[J]. *Remote Sensing Information*, 2018,33(6):86-91(唐尧,王立娟,马国超,等.基于“高分+”的矿山尾矿库“安全红线”提取与危险性分析[J].遥感信息,2018,33(6):86-91)
- [5] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry—A Case Study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12):2 039-2 049(张路,廖明生,董杰,等.基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J].武汉大学学报·信息科学版,2018,43(12):2 039-2 049)
- [6] 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):1 534-1 551(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):1 534-1 551)
- [7] Chengdu University of Technology. There are Obvious Signs of Deformation Before Sliding! “InSAR Technology Research Center for Geological Hazards” Released the Latest Analysis Report of the Jinsha River Landslide-Baige Dammed Lake [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/aaJW7NyVWSNi7fw4dsJ2MQ>, 2018(成都理工大学.滑前已有明显变形迹象!“地质灾害 InSAR 技术研究中心”发布金沙江白格滑坡-堰塞湖最新分析报告[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/aaJW7NyVWSNi7fw4dsJ2MQ>, 2018)
- [8] Ministry of Natural Resources. Jinsha River Dammed Lake Emergency Disposal Achieved a Phased Victory [EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/o/2018-10-16/doc-ifxeuwws4771907.shtml>, 2018(自然资源部.金沙江堰塞湖应急处置取得阶段性胜利[EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/o/2018-10-16/doc-ifxeuwws4771907.shtml>, 2018)
- [9] Ding Chao, Feng Guangcai, Zhou Yubin, et al. Nepal Earthquake Triggered Landslides Recognition and Deformation Analysis of Avalanches’ Region [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6):847-853,950(丁超,冯光财,周玉杉,等.尼泊尔地震触发滑坡识别和雪崩形变分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2018,43(6):847-853,950)
- [10] Deng Jianhui. Analysis on the Mechanism and Process of Landslide in Baige Village, Jiangda County, Tibet Autonomous Region[R]. Chengdu, 2018(邓建辉.西藏自治区江达县白格村滑坡机制与过程分析[R].成都,2018)
- [11] Zhuang Jianqi, Peng Jianbing, Li Tonglu, et al. Triggered Factors and Motion Simulation of “9·17” Baqiao Catastrophic Landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(4):747-754(庄建琦,彭建兵,李同录,等.“9·17”灞桥灾难性黄土滑坡形成因素与运动模拟[J].工程地质学报,2015,23(4):747-754)
- [12] Chang Jinyuan, Bao Han, Wu Faquan, et al. Discussion on Stability of Shallow Landslide Under Rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4):995-1 001(常金源,包涵,伍法权,等.降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J].岩土力学,2015,36(4):995-1 001)

Disaster Monitoring and Application Prospect Analysis of the Jinsha River Landslide Based on “Gaofen+”

TANG Yao^{1,2} WANG Lijuan^{1,2} MA Guochao^{1,2} JIA Hujun^{1,2}
LI Hongliang^{1,2} YIN Heng^{1,2}

¹ Sichuan Academy of Safety Science and Technology, Chengdu 610045, China

² Major Hazard Measurement and Control Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610045, China

Abstract: Based on the “Gaofen +”, this paper explores the emergency analysis of the Jinsha River landslide disasters on October 11 and November 3, 2018, with the “Gaofen + geological disaster” model, and uses the high-resolution remote sensing image of the disaster area before and after the disaster to interpret the landslide. According to the basic disaster information of the disaster, the characteristics of pregnancy disaster and deformation and creep before and after the disaster are analyzed. The hidden dangers are investigated in the Baige Lake and surrounding areas after the disaster. The suspected cracks and secondary landslide hazard points on both sides of the barrier lake are identified, and road accessibility analysis of disaster areas after the second landslide is carried out. The results show that the “Gaofen +” model has great potential for the application of natural disasters such as the Jinsha River landslide, disaster monitoring and emergency rescue roads.

Key words: “Gaofen+”; the Jinsha River landslide; disaster situation monitoring; disaster emergency analysis; application prospect

First author: TANG Yao, master, senior engineer, specializes in applied research on remote sensing monitoring of geological disasters.
E-mail: tangyao985@163.com

Foundation support: The National Defense Science and Technology Bureau High-Scoring Special Province(Autonomous Region) Domain Industrialization Application Project, No. 87-Y40G06-9001-15/18; Military Technology Re-development Project of National Defense Science and Technology Office of Mianyang City, Sichuan Province, No. zyf-2017-37; the Key Research and Development Project of Sichuan Science and Technology Department, Nos. 2018GZ0051, 2019YFS0073.