



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

许强¹ 董秀军¹ 李为乐¹

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

摘要:中国地质灾害点多面广,且大多地处高位并被植被覆盖,传统的人工调查排查在一些地区进行地质灾害隐患识别已显得无能为力,这也是近年来绝大多数灾难性地质灾害事件都不在预案点范围内的主要原因。提出通过构建天-空-地一体化的“三查”体系进行重大地质灾害隐患的早期识别,再通过专业监测,在掌握地质灾害动态发展规律和特征的基础上,进行地质灾害的实时预警预报,以此破解“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”这一地质灾害防治领域的难题和国家急切需求。“三查”体系首先通过光学遥感和合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)实现区域扫面性地质灾害隐患的普查,随后利用机载激光雷达测量技术(light laser detection and ranging, LiDAR)和无人机摄影测量实现高地质灾害风险区段和重大地质灾害隐患的详查,最后采用现场调查、地面与坡体内部监(探)测等手段,实现重大地质灾害隐患的复核确认和排除,即核查。监测预警则是通过 InSAR 和地面观测手段(如全球导航卫星系统、裂缝计等),在掌握滑坡崩塌的变形规律和阶段以及时间-空间变形特征的基础上,建立分级综合预警体系,并利用地质灾害实时监测预警系统,逐步实现地质灾害监测预警的实用化和业务化运行。

关键词:地质灾害;早期识别;监测预警;“三查”体系;InSAR;LiDAR

中图分类号:P237

文献标志码:A

中国山地丘陵区约占国土面积的65%,地质条件复杂,构造活动频繁,崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害点多面广、防范难度大,是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一。目前,已发现全国共有地质灾害隐患点近30万处,威胁约2000万人的生命安全和4500亿元的财产安全。

面对严峻复杂的地质灾害防治形势,中国自20世纪90年代起,先后开展了系统全面的地质灾害详细调查和多轮针对灾害隐患的拉网式、地毯式排查,每年汛期不断巡查,并在此基础上建立了较为完善的群测群防体系。但近年来,中国仍不断有灾难性的地质灾害事件发生,代表性的有2017-06-24四川茂县叠溪镇新磨村滑坡,瞬间将整个村庄几乎掩埋,造成83人死亡和失踪;2018-10西藏雅鲁藏布江米林段色东普沟先后两次发生冰崩-碎屑流-堰塞堵江事件;2018-10和2018-11西藏江达县波罗乡白格村也先后两次发生大

型滑坡-堰塞堵江事件。这些事件不仅造成了惨重的生命财产损失,而且引起了社会的广泛关注和国家的高度重视。事后调查发现,这些导致灾难性后果的地质灾害70%以上都不在已知的地质灾害隐患点范围内,其主要原因在于:灾害源区地处大山中上部,多数区域人迹罕至,且被植被覆盖,具有高位、隐蔽性特点,传统的人工排查和群测群防在此类灾害面前已无能为力,传统手段很难提前发现此类灾害隐患。因此,如何提前发现和有效识别出重大地质灾害的潜在隐患并加以主动防控,已成为近期地质灾害防治领域集中关注的焦点和难点。

2018-10-10,习近平总书记主持召开中央财经委员会第3次会议,明确指出:“要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。”并提出推动建设“九大工程”,其中包括:实施灾害风险调查和重点隐患排查工程,掌握风险隐患底数;实施自然灾害监测预警信息化工程,

收稿日期:2019-03-09

项目资助:国家创新研究群体科学基金(41521002);四川省自然资源厅重大科技支撑研究课题(KJ-2018-21);四川省科技支撑计划项目(2018SZ0339)。

第一作者:许强,博士,教授,主要从事地质灾害防治的理论与方法研究。xq@cdu.edu.cn

提高多灾种和灾害链综合监测、风险早期识别和预报预警能力。2018年,新组建的自然资源部和应急管理部先后多次召开专题会议,讨论了地质灾害防治问题。自然资源部陆昊部长提出地质灾害防治的“四步”工作方案,即研究原理、发现隐患、监测隐患、发布预警。同时强调,当前防范地质灾害的核心需求是要搞清楚“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”。为此,本文围绕这一核心需求,重点探讨如何利用天-空-地一体化的多源立体观(探)测技术实现重大地质灾害隐患的早期识别和监测预警,提升主动防范能力和水平。

1 重大地质灾害隐患及特征

根据国务院2003年颁发的《地质灾害防治条例》,地质灾害是指包括自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害。通常,山体崩塌、滑坡、泥石流的发生具有一定的突发性,被称为突发性地质灾害;而地面塌陷、地裂缝以及地面沉降的形成和发生往往较为缓慢,被称为渐变性地地质灾害。人们所关注的地质灾害隐患主要指滑坡、崩塌、泥石流等突发性灾害。而重大地质灾害隐患是指可能造成重大人员伤亡和严重后果的潜在地质灾害隐患点。其中,“重大”主要体现在两方面,一是造成重大人员伤亡,二是造成重大财产和经济损失或广泛的社会影响。近年来,中国造成重大人员伤亡的典型地质灾害事件有:2009-06-05重庆武隆鸡尾山滑坡致79人死亡;2009-08-08莫拉克台风诱发台湾小林村发生滑坡,瞬间将小林村全部掩埋,致使近500人遇难;2010-06-28贵州省关岭滑坡致99人死亡;2010-08-08甘肃舟曲泥石流致1765人死亡;2013-07-10四川省都江堰五里坡滑坡致161人死亡;2017年茂县新磨村滑坡致83人死亡。近年来,中国造成严重后果的典型地质灾害事件如2000-04-09西藏波密县易贡乡发生巨型山体滑坡-碎屑流-堵江,堵断易贡藏布,形成易贡湖,最大库容达到 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。两个月后,也即2000-06-10,堰塞坝溃决产生的洪水洪峰流量达到 $12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,最高洪水位超过50 m,不仅将其下游雅鲁藏布江流域洪水位以下的所有基础设施一扫而光,直接经济损失达上百亿元,而且洪水直达印度,造成巨大的洪涝灾害,冲毁20多座桥梁,致使印度94人死亡和5万人无家可归,产生广泛的国际影响。2018年,西藏米林两次冰崩和

白格两次滑坡堰塞堵江事件也产生了广泛的社会影响。尤其是2018-11-03白格第2次滑坡-堰塞堵江事件,因坝体过高(堰塞湖水位可到50 m),堰塞湖库容较大(超过 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$),相关部门不得不通过修建导流槽,主动降低堰塞湖水位。经过人工干预,堰塞体于2018-11-13被冲开,险情得以解除,但下泄的洪水在下游的四川、云南境内造成严重的洪涝灾害,直接经济损失达上百亿元。

重大地质灾害一般具有高位、隐蔽性、远程运动、灾害链效应等特点。高位是指发生地质灾害的源区往往地处山体的中上部斜坡陡峭部位,地质调查人员往往难以到达,有些灾害隐患甚至处于人迹罕至的部位或无人区,传统的人工调查、排查手段已很难发现其隐患的存在。隐蔽性是指西南山区大多植被茂密,斜坡变形迹象和滑坡征兆因被植被遮挡,往往较难发现。远程运动是指大型(一般指体积超过 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$)滑坡、崩塌在启动后,往往通过沿途碰撞解体转化为碎屑流,呈远程高速流(运)动,其距离可达数千米乃至数十千米,使灾害危害范围扩大。灾害链效应是指某些灾害在满足一定条件时,可转化为链式灾害。如滑坡转化为碎屑流远距离运动,堵塞河道形成堰塞湖,在上游产生淹没灾害,堰塞湖溃决后还会在下游产生洪涝灾害等,使灾害的影响和损失往往呈数量级放大。在高山峡谷区,大多数村落往往坐落于沟口的大型古老泥石流堆积扇上,而大型沟谷长度一般达数千米乃至数十千米,沟头下雨并形成泥石流,但居住在沟口的人员可能因沟口天气良好,根本察觉不到危险的存在。2010-08-08甘肃舟曲泥石流灾难性事件就是这样造成的。

宏观上讲,地质灾害最容易发生在地质环境脆弱的区域和稳定性相对较差的斜坡部位,这些区域和部位就是需重点关注的潜在地质灾害隐患区。具体地讲,地质灾害隐患一般集中于以下几个区域:

1)正在变形区。现阶段正在发生变形的区域,显然是最有可能造成失稳破坏和成灾的区域,自然也就成为需重点关注的地质灾害隐患区。

2)曾经变形区。历史上曾经发生过明显变形,但现阶段已停止变形。如历史上曾经发生过短距离滑动的滑坡,强震导致的震裂山体,或因构造、风化卸荷等因素导致的山体变形开裂等。这些区域一般岩体较为破碎,稳定性差,且往往存在竖向张拉裂缝,具有很好的雨水入渗通道,在强烈外在因素(如强降雨、强震和强烈的人类工程活动等)的作用下,很容易重新变形和失稳破坏。

3) 稳定性较差的斜坡。受构造、卸荷、地震等因素影响,斜坡岩体节理裂隙发育,岩体破碎,尤其是当斜坡中存在有利于岩体滑动的结构面(如顺倾坡外的层面、节理裂隙、软弱夹层等)或斜坡岩体被结构面切割成可变形和滑动的块体时,其稳定性往往较差,容易发生失稳破坏。

4) 大型松散堆积体。各种成因的深厚堆积体(如古老滑坡、崩塌、泥石流堆积体,冰川、冰水堆积体,风积、洪积等),尤其是古老滑坡堆积体,与基岩斜坡相比,其结构松散,稳定性相对较差。当其形态和条件发生改变时,稳定性可能降低,发生变形和失稳破坏。

在明确重大地质灾害隐患的主要类型、特点、主要出露部位后,就可以采取针对性的措施进行地质灾害隐患的早期识别和提前发现,解决“隐患点在哪里”的问题。

2 天-空-地一体化的重大地质灾害隐患识别的“三查”体系

中国地质灾害隐患点多面广,且往往地处高位和被植被覆盖,传统的人工调查和排查已很难

发现这些隐患点。为了突破传统人工调查和排查的局限,本文提出可通过构建基于星载平台(高分辨率光学+合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR))、航空平台(机载激光雷达测量技术(light laser detection and ranging, LiDAR)+无人机摄影测量)、地面平台(斜坡地表和内部观测)的天-空-地一体化的多源立体观测体系,进行重大地质灾害隐患的早期识别。具体地讲,首先借助于高分辨率的光学影像和 InSAR 识别历史上曾经发生过明显变形破坏和正在变形的区域,实现对重大地质灾害隐患区域性、扫面性的普查;随后,借助于机载 LiDAR 和无人机航拍,对地质灾害高风险区、隐患集中分布区或重大地质灾害隐患点的地形地貌、地表变形破坏迹象乃至岩体结构等进行详细调查,实现对重大地质灾害隐患的详查;最后,通过地面调查复核以及地表和斜坡内部的观测,甄别并确认或排除普查和详查结果,实现对重大地质灾害隐患的核查(图 1)。地质灾害隐患识别的“三查”体系类似于医学上大病检查和确诊过程,先通过全面体检筛查出重大病患者,再通过详细检查和临床诊断,确诊或排除病患。

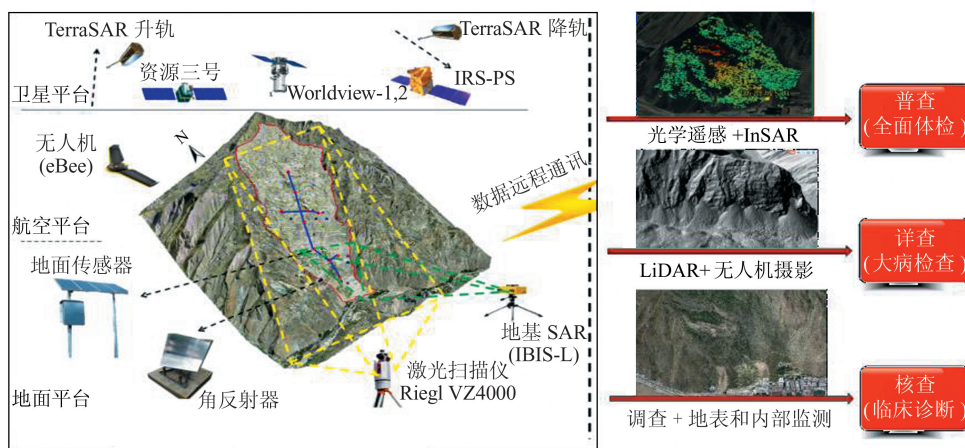


图 1 天-空-地一体化的多源立体观测体系与地质灾害隐患早期识别的“三查”体系

Fig. 1 Integrated Space-Air-Ground Multi-source Monitoring System for Early Detection of Potential Geohazards

2.1 基于光学遥感和 InSAR 的地质灾害隐患普查

卫星光学遥感技术因其时效性好、宏观性强、信息丰富等特点,已成为重大自然灾害调查分析和灾情评估的一种重要技术手段。早在 20 世纪 70 年代, Landsat(分辨率 30~80 m)、SPOT(分辨率 10~20 m)等中等分辨率的光学卫星影像便被用于地质灾害探测分析。20 世纪 80 年代,黑白航空影像被用于单体地质灾害探测。20 世纪 90 年代以后, IKONOS(分辨率 1.0 m)、QuickBird(分辨率 0.60 m)等高分辨率的卫星影像被广泛用

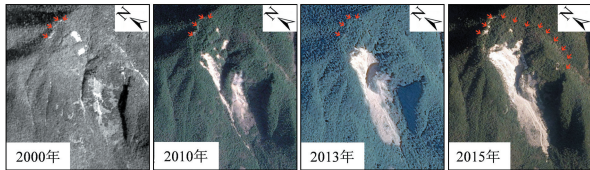
于地质灾害探测与监测。目前,光学遥感正朝着高空间分辨率(商业卫星分辨率最高为 WorldView-3/4 0.3 m)、高光谱分辨率(波段数可达数百个)、高时间分辨率(Planet 高分辨率小卫星的重返周期可小于 1 d)的方向发展。光学遥感技术在地质灾害研究中的应用逐渐从单一的遥感资料向多时相、多数据源的复合分析发展,从静态地质灾害辨识、形态分析向地质灾害变形动态观测过渡。

地表变形会导致光谱特性变化,由此可利用光学遥感的颜色变化来有效识别地表变形,从而

圈定潜在的地质灾害隐患。例如,2016-09-28 浙江丽水苏村发生滑坡,瞬间将苏村部分掩埋,导致 26 人死亡(图 2(a))。滑坡源区地处高位且植被茂盛,但实际上滑坡前其变形在光学遥感影像上已清楚显示。从图 2(b)可以看出,在 2000 年的遥感影像上就能看到明显的变形迹象,随后变形逐渐发展,空间范围逐渐增大,到 2016 年滑坡发生前,控制滑坡范围的边界裂缝已清晰可见。



(a) 2016-09-28 浙江丽水苏村滑坡



(b) 苏村滑坡发生前不同时段的光学遥感影像

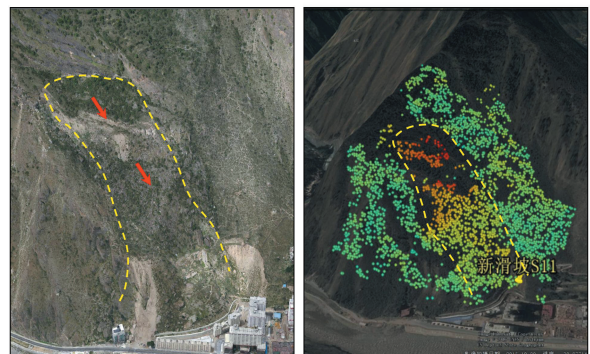
图 2 浙江丽水苏村滑坡及其滑坡前遥感影像
Fig. 2 Sucun Landslide in Lishui, Zhejiang and Optical Images Before Landslide Occurrence

随着光学遥感影像分辨率的不断提高以及卫星数目的不断增多,观测的精度将不断提高,获取影像的时间间隔也将大大缩短,不久的将来就可实现任一地点每天都有一次的卫星影像覆盖,对地质灾害隐患的早期识别和应急抢险将大有裨益。

InSAR 技术具有全天候、全天时、覆盖范围广、空间分辨率高、非接触、综合成本低等优点,适宜于开展大范围地质灾害普查与长期持续观测。特别是 InSAR 具有的大范围连续跟踪微小形变的特性,使其对正在变形区具有独特的识别能力。1996 年,法国学者 Fruneau 等首先证明了合成孔径雷达差分干涉测量技术(differential InSAR, DInSAR)可有效用于小范围滑坡形变监测^[1],随后世界各国学者陆续开展了 DInSAR 在滑坡监测中的应用研究,取得了一些成功案例^[2-6]。但在实际应用中,特别是地形起伏较大的山区,星载 InSAR 的应用效果往往受到几何畸变、时空去相干和大气扰动等因素的制约,具有一定的局限性。此外,应用 DInSAR 只能监测两时相间发生的相对形变,无法获取研究区域地表形变在时间维上的演化情况,这是由该技术自身的局限性所决定

的^[7]。针对这些问题,国内外学者在 DInSAR 的基础上,发展提出了多种时间序列 InSAR 技术,包括永久散射体干涉测量、小基线集干涉测量、SqueeSAR 等^[8-13]。这些方法通过对重复轨道观测获取的多时相雷达数据,集中提取具有稳定散射特性的高相干点目标上的时序相位信号进行分析,反演研究区域地表形变平均速率和时间序列形变信息,能够取得厘米级甚至毫米级的形变测量精度。

欧洲(尤其是意大利)已经实现了基于 InSAR 的全国范围地质灾害隐患普查^[14]。近年来,中国将 InSAR 用于地质灾害的长期监测与隐患早期识别方面也取得了长足进步。图 3 是 2017 年因明显变形而实施应急处置的丹巴县五里牌滑坡的 InSAR 变形监测结果。从图 3 可以看出,利用 InSAR 不仅可以识别滑坡隐患,还可以较为精确地圈定滑坡边界,定量分析评价滑坡各部位形变的量级和动态演化状况,为滑坡稳定性评判提供了重要手段。尤其是 2017 年以来,国内外多位学者通过对 2017 年茂县新磨村滑坡、2018 年西藏米林冰崩和白格滑坡等进行分析研究^[15-17],结果表明,时序 InSAR 技术能够有效捕捉滑坡发生前的地表形变,尤其是大面积缓慢蠕滑变形以及滑坡失稳前的加速变形信号^[18-19],为提前识别和发现处于正在缓慢蠕滑变形的滑坡隐患提供了非常有效的手段。



(a) 丹巴县五里牌滑坡及其变形情况 (b) 五里牌滑坡变形 InSAR 监测结果

图 3 丹巴县五里牌滑坡及其 InSAR 监测结果
(图 3(b)由武汉大学提供)

Fig. 3 Wulipai Landslide in Danba and the InSAR Monitoring Results (Fig. 3(b) is Provided by Wuhan University)

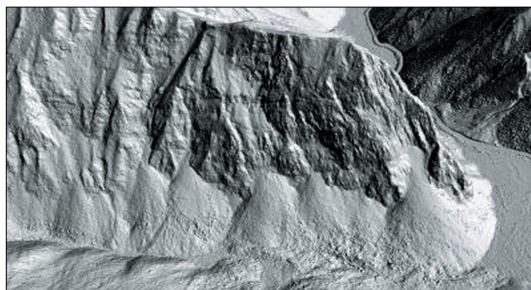
2.2 基于机载 LiDAR 和无人机航拍的地质灾害隐患详查

LiDAR 通过集成定姿定位系统和激光测距仪,能够直接获取观测区域的三维表面坐标。机

载 LiDAR 集成了位置测量系统、姿态测量系统、三维激光扫描仪(点云获取)、数码相机(影像获取)等设备。机载 LiDAR 不仅能够提供高分辨率、高精度的地形地貌影像,同时通过多次回波技术穿透地面植被,利用滤波算法有效去除地表植被,获取真实地面的高程数据信息,为高位、隐蔽性的地质灾害隐患识别提供了重要手段。2017-08-08,九寨沟地震使九寨沟景区惨遭重创,产生了数千处地质灾害,景区被迫关闭。为了查明九寨沟地震区的地质灾害隐患,利用直升机同时搭载三维激光扫描仪和高分辨率光学镜头进行机载 LiDAR 识别地质灾害隐患的试验研究,图 4 是某区域的试验成果。从图 4(a)可以看出,九寨沟景区植被茂盛,通过摄影测量获取的光学影像可清楚地识别出 8·8 九寨沟地震产生的同震地质灾害,但对植被下的灾害隐患一无所知。利用 LiDAR 数据去除植被后,获取的数字地表模型(digital surface model, DSM)可清楚地看到植被覆盖下的崩塌松散堆积体(图 4(b))、古老滑坡堆积体、泥石流堆积扇以及较大的震裂山体裂缝,这些都是最容易发生地质灾害的潜在隐患。通过 LiDAR 去除植被后,生成高精度的 DSM,会使掩盖于植被之下的各种山体损伤和松散堆积体暴露无遗,可有效识别隐蔽性灾害,这一特殊功能是其其他遥感技术不能比拟的。



(a) 九寨沟景区光学影像



(b) 与图 4(a) 对应区去除植被后的 DSM 模型

图 4 九寨沟景区机载 LiDAR 解译结果

Fig. 4 Interpretation Results in Jiuzhaigou from Airborne LiDAR

随着无人机技术的突飞猛进,利用无人机可进行高精度(厘米级)的垂直航空摄影测量和倾斜

摄影测量,并快速生成测区数字地形图、数字正射影像图、数字地表模型、数字地面模型。利用三维 DSM 不仅可以清楚直观地查看斜坡的历史和现今变形破坏迹象(如地表裂缝、拉陷槽、错台、滑坡壁等),以此发现和识别地质灾害隐患,还可进行地表垂直位移、体积变化、变化前后剖面的计算。例如,在 2017-06-24 茂县新磨村滑坡的应急处置过程中,由于滑坡源区地处高位,现场人员对山体中上部情况基本一无所知。2017-06-25,通过无人机获取滑坡源区的 DSM 模型后,发现滑坡右侧存在一个巨大的变形体^[15],用 DSM 模型量测出其体积达 $4.55 \times 10^8 \text{ m}^3$,与主滑体 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 相当,在其后缘存在一宽度达 40 m 的拉陷槽(图 5(a)),对坡脚数百名应急抢险人员的安全构成严重威胁,为此进行了紧急避让撤离。2017 年九寨沟 8·8 地震后,在短时间内利用无人机航拍生成的三维 DSM,发现了多处高位震裂山体和潜在地质灾害隐患(图 5(b)),将相关情况及时上报给现场抗震救灾指挥部后,采取了紧急避让措施。由此可见,利用无人机航拍进行地质灾害隐患识别具有方便快捷、直观形象等特点,必将成为地质灾害隐患识别的重要手段。



(a) 茂县新磨村右侧变形体



(b) 九寨沟 8·8 地震导致的漳扎镇灾害隐患

图 5 利用无人机 DSM 模型识别和发现茂县新磨村滑坡区和九寨沟震区高位地质灾害隐患

Fig. 5 Detection and Finding of Potential Landslide in Xinmo Village and Jiuzhaigou Earthquake Area Through UAVs and DSM Model

2.3 基于地面调查和监测的地质灾害隐患核查

利用空-天遥感手段仅是从外貌形态进行地质灾害隐患的识别,因受多种因素影响,其识别结

果并不一定完全正确,可能会出现误判。因此,利用遥感技术识别出来的地质灾害隐患点还需要地质人员到达现场进行逐一调查复核,甄别、确认或排除隐患点,有时还要借助于现场观测和探测手段,才能准确判定。如从地形地貌上像古老滑坡堆积体的区域,有时还得通过物探、槽探等手段,根据坡体结构和物质组成才能确认。另外,在斜坡变形初期,通过 InSAR 可能会发现其变形迹象,但变形裂缝并不一定会明显显露,此时就需要通过地面观测(如全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)、地基合成孔径雷达系统(ground-based SAR,GBSAR)等)才能确认其是否真的存在变形。这一过程称之为核查,相当于医院医生通过对病人的望闻问切,并结合电子计算机断层扫描、B型超声波检查等检测结果进行综合判断,最后确认或排除病患。

上述地质灾害隐患识别的“三查”体系已在四川、贵州等省进行示范应用,并取得了良好的成效。贵州省利用 InSAR、机载 LiDAR,对全省高位隐蔽性灾害进行专业排查,发现新的地质灾害隐患点近 2 000 处,其中高位隐蔽性隐患点近 900 处。四川省利用 InSAR 与光学遥感相结合,对 6 万 km² 的地质灾害高风险区进行扫面性隐患识别,新发现形变区 840 处,经现场调查复核,具有明显变形的点超过 70%。通过对九寨沟核心景区进行机载 LiDAR 的示范应用,在面积仅 50 km² 的区域解译识别出同震地质灾害 2 126 处,历史灾害 83 处,潜在隐患 26 处。2018 年金沙江白格滑坡发生后,利用光学遥感和 InSAR 相结合的手段,短期内在金沙江流域白格滑坡上下游数十千米的区段内,识别出 50 余处地质灾害隐患,同时确认了几处重大地质灾害隐患。

3 地质灾害的监测预警

利用上述“三查”体系,结合人工调查和排查,便可发现绝大多数地质灾害隐患。但是,发现隐患后该怎么办?这是一个非常现实的问题。本文提出采用如下手段和原则对待和处理新发现的地质灾害隐患。

1) 理性看待。地质的时间尺度和空间尺度与人类都不在一个数量级上,地质学上的时间尺度一般以万年甚至百万年来计算,而人的时间尺度一般以天、年等来计算。这是因为地质体的发展演化一般需要很长时间,且出现隐患并不一定很快就会成灾。

2) 科学评判。对发现的灾害隐患进行科学的分析评判非常重要。通过分析研究,查明灾害隐患的类型、目前所处的发展阶段及其稳定性状况,预测其发展演化趋势,评判其危险性程度和风险,并据此制定有针对性的、科学合理的应对措施。常用的应对措施包括避让搬迁、排除危险、工程治理以及监测预警等。对于已出现明显险情、风险很高的灾害隐患,通过经济效益评估,选择避让搬迁或排除危险等应急处置措施;而对于危害性很大但目前危险性并不太高的灾害隐患,应采取工程治理措施进行主动加固;而对于危害性较大但目前其状况还不够明确的灾害隐患,应通过专业监测来掌握其变形阶段和发展趋势,并据此制定应对方案;而对于一般性的灾害隐患,可直接纳入预案点范围,进行群测群防即可。

3) 监测预警。专业监测预警是科学防范地质灾害的重要手段。一般可先采用时序 InSAR 监测其目前的变形状况,同时对历史变形进行追踪,判定其变形所处阶段。若变形速率较大或已进入加速变形阶段,则应及时布设地面传感器(如 GNSS、裂缝计、雨量计等)和坡体内部传感器(如钻孔倾斜仪、地下水位计等),对地表和内部的变形及其外在影响因素进行精准密集监测,并根据监测结果在实际灾害发生前发出预警信息,以保障受威胁人员的生命财产安全。目前,地质灾害的地面和坡体内部的监测中,各种指标(位移、应力、含水量、水位、雨量等)的现场自动采集、监测数据的远程无线传输等技术均已成熟,其难点在于对现场监测数据的分析处理以及根据监测数据对灾害的发生时间作出及时准确的预警预报。那么,在地质灾害发生前,究竟能不能提前作出预警预报呢?客观地讲,目前地质灾害的预警预报还是一个国际难题,还不可能提前对灾害的发生时间作出准确的预报。但近年来的研究和实践证明,对大多数已进行科学、专业监测的地质灾害体而言,在灾害发生前,提前数小时、数分钟发出预警信息还是可能的。

从保障人民生命安全的角度分析,泥石流灾害的预警相比滑坡、崩塌要简单。一方面,是因为泥石流受水力驱动,有足够的水量(如降雨、冰雪融水等)才会有泥石流发生,所以通过监测降雨量和沟谷水流量可有效预测泥石流;另一方面,泥石流沟谷长度大多为数千米乃至数十千米,泥石流流速一般为每秒数米至数十米左右,泥石流爆发后,其从上游源头区流到下游沟口(村镇大多位于沟口的泥石流堆积扇)一般需要数分钟乃至数十

分钟的时间,通过视频、泥位计等手段就可以对泥石流的发生过程进行全面监控。也就是说,除泥石流发生前,可根据当地降雨量和沟谷流量等提前预警外,即使泥石流已经发生,只要进行科学的实时监测预警,也有时间组织沟口人员进行紧急撤离避险。

崩塌、滑坡的预警难度相对较大,尤其是崩塌灾害和某些类型的滑坡,其发生具有突发性,预警难度很大。但大量的滑坡实例表明,滑坡尤其是重力型滑坡(主要受重力作用形成的滑坡,而非地震、降雨、人类工程活动诱发的滑坡),基本都能满足日本学者斋藤提出的 3 阶段变形规律(图 6)。通过 InSAR、GBSAR、GNSS、裂缝计等变形监测手段的持续监测,获取滑坡的变形时间序列曲线,结合监测数据不难判断滑坡当前处于哪一阶段。理论和实践均表明,滑坡进入加速变形阶段是滑坡发生的前提,也是滑坡预警的重要依据。也就是说,若滑坡还处于等速变形阶段,即使有较大的变形速率(一般可达每天数厘米、数分米),也未必会发生滑坡,但一旦进入加速变形阶段,则预示着在未来不久将会发生滑坡。因此,对于新发现的重大滑坡隐患,一般应尽快实施变形监测,掌握滑坡所处的变形阶段,并由此判断滑坡的稳定性和危险性。

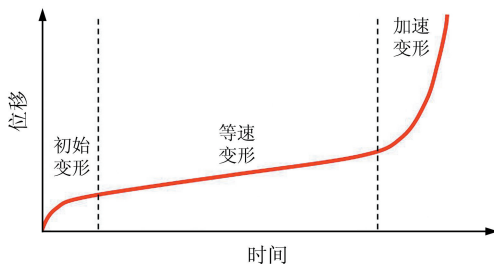
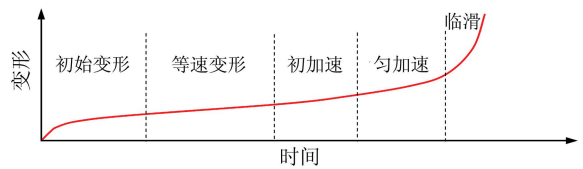


图 6 斋藤提出的滑坡 3 阶段变形曲线

Fig. 6 Three-Stage Deformation Curve of Landslide Proposed by Saito

基于滑坡的 3 阶段变形规律以及加速变形对滑坡预警的重要性,文献[20]对滑坡的加速变形阶段进行了细分,并通过统计分析给出了基于变形的滑坡 4 级综合预警准则(图 7)。滑坡预警级别划分的主要依据,一是根据变形-时间曲线各阶段的特征差异,如曲线斜率(切线角)、加速度、速度增量等;二是根据宏观变形迹象,如地表裂缝的动态发展状况、分期配套特征、滑动面的贯通情况,以及临滑阶段的前兆特征等;三是根据稳定性系数。理论上讲,在滑坡等速变形阶段,其稳定性系数应该在 1 上下波动,而一旦进入加速变形阶段,其稳定性系数将降低到 1 以下,临滑阶段其应远小于 1。



预警级别	警报形式	地表裂缝(空间)	切线角(时间)	稳定系数(强度)	加速度(时间)
注意级	蓝色	后缘、两侧及前缘裂缝分期有序形式	$\alpha \approx 45^\circ$	$1.0 \leq K \leq 1.05$	在一定幅度内震荡
警示级	黄色	地面裂缝逐渐配套贯通,并最终圈闭	$45^\circ < \alpha < 80^\circ$	$0.95 < K < 1.0$	
警戒级	橙色		$80^\circ \leq \alpha < 85^\circ$		
警报级	红色	后缘裂缝急剧拉开,前缘出现隆起、小崩小落	$\alpha \geq 85^\circ$	$K \leq 0.95$	骤然剧增

图 7 基于变形观测的滑坡 4 级综合预警

Fig. 7 Outline of the Four-Level Comprehensive Warning for Landslide Based on the Deformation Observation

为了使地质灾害监测预警能够实用化和业务化,本文基于全球广域网绘图协议的三维数字地球,研发了地质灾害实时监测预警系统(图 8),实现了现场监测数据的自动采集、远程无线传输、实时自动分析预警和预警信息的自动发送等功能。该系统在 2017 年曾两次提前数小时成功预警甘肃黑方台黄土滑坡。2018 年 11 月,金沙江白格滑坡堰塞体应急处置过程中,直接使用该系统进行监测预警,对施工现场的几次小规模垮塌均作出了提前预警,保证了施工安全^[17]。该系统已用于贵州省地质灾害监测预警的业务化运行,对数百处滑坡隐患进行实时自动监控,一旦某灾害点出现临灾征兆,系统会通过短信等方式将预警信息及时自动发送给相关人员。

4 结论与讨论

中国地质灾害点多面广,不少灾害源区地处高位,且被植被覆盖,仅靠传统的人工调查和排查已很难提前发现和预警重大地质灾害隐患。本文引入现代遥感技术,围绕国家防灾减灾的紧迫需求,拟重点回答和解决地质灾害“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”这两个关键问题。得到以下认识:

1) 利用高分辨率的光学遥感影像,通过地形地貌可识别出绝大多数古老滑坡、崩塌堆积体以及泥石流沟,它们在遭受强烈的外界扰动后(如强降雨、强震和强烈人类工程活动),有可能复活或再次发生地质灾害,因而成为常见的地质灾害隐患点。同时,因地表变形会导致光谱特性的变化,可利用光学遥感的颜色变化来有效识别地表变形,圈定潜在的地质灾害隐患。利用多时序遥感

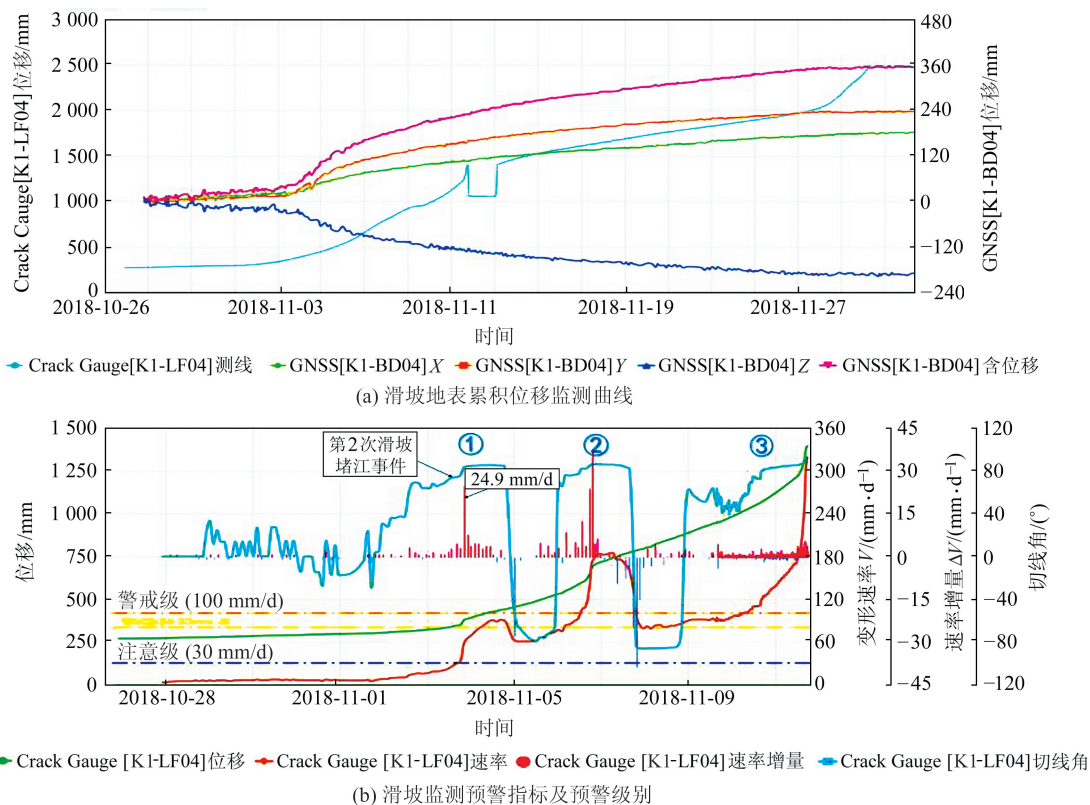


图8 地质灾害实时监测预警系统

Fig. 8 Real-Time Monitoring and Warning System of Geohazards

影像还可清楚掌握灾害变形的动态演化过程和特征,有助于判断隐患的规模和危险性程度。但光学遥感也存在不足,一是受天气影响明显,如时常因云雾天气而不能获取有效的影像;二是光学影像虽然直观形象,但也容易误判。

2) InSAR 具有全天候、全天时工作的特点,尤其是具有大范围连续跟踪观测微小地表形变的能力,是识别和发现正在变形的地质灾害隐患的非常有效和重要的手段,近年来的示范应用效果显著。但 InSAR 也有一定的局限性,如只能用于识别目前正在发生缓慢变形的地质灾害隐患,对于未变形的地质灾害并不具备识别能力。另外,由于 InSAR 主要利用相干性原理监测地表形变,复杂地形、植被等都会影响相干性,甚至造成失相干现象。升降轨的拍摄方向也受到很大的限制,有些斜坡方向很难被 InSAR 拍摄到。同时,目前的 InSAR 解译并不是非常成熟和流程化,其解译结果的好坏在一定程度上取决于解译人员的经验和专业水平,因此,短期内还达不到全面开花、大范围推广应用的程度。中国应加大对 InSAR 研究、解译和科学应用方面的人才培养力度。

3) 利用机载 LiDAR 不仅可以获取高分辨率、高精度的数字高程模型,而且利用去除植被后的真实地形很容易识别和发现古老滑坡崩塌堆积

体和其他各种成因的松散堆积体,以及历史上受地震、长期重力作用而发生明显开裂、移位的斜坡岩体,这些都是山区斜坡最脆弱的部位,也是最容易发生地质灾害的潜在隐患区。但目前搭载 LiDAR 的飞行平台受到较多限制,且实施费用昂贵,无人机摄影测量也面临同样的问题。中国应尽快开展相关方面的专业飞行平台研发和示范应用,增强 LiDAR 适应复杂环境的能力,降低成本,同时积累相关方面的经验,努力提高扫描和解译精度,提升基于 LiDAR 的地质灾害隐患识别能力。

4) 光学遥感、InSAR、LiDAR、无人机摄影测量等现代遥感技术都有各自的优势和能力,但也都有各自的条件限制和缺点,所以不能靠单一的技术手段来解决灾害隐患识别问题。为此,本文构建了基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患识别的“三查”体系。该“三查”体系具有“四多”特点:一是多学科交叉融合,其涉及到测量学、工程地质学、遥感地质、计算机技术等多个学科;二是多层次多平台,其综合应用了星载平台、航空平台、地面和坡体内部平台;三是多源数据,包括光学遥感、InSAR、LiDAR、无人机航测以及各种地面和坡体内部观测数据;四是多时序,通过光学遥感、InSAR 等手段,不仅可以掌握现状,还可以进

行历史追溯和未来长期持续观测,获取多时序数据。“三查”体系遵照从宏观到微观,从区域到区段和单体,分层次分步骤逐步实现复杂山区的地质灾害隐患早期识别和提前发现,为破解“隐患在哪里”这一科技难题提供了解决方案,但这一“技防”措施主要适用于高位隐蔽性的大型地质灾害。中国地质灾害点多面广,对于一般性的地质灾害,人工调查排查和群测群防还是必不可少,得将“技防”和“人防”有机结合,相互补充验证,才能最大限度地发现地质灾害隐患。

5)地质尺度与人类尺度不在一个数量级,隐患并不一定很快就会成灾。因此,在发现重大地质灾害隐患后,理性对待和科学评判显得非常重要。要在科学评判的基础上,制定科学合理的主动防范措施,如避让搬迁、排危除险、工程治理和监测预警。在大多数情况下,应对重大地质灾害实施专业监测,在掌握其动态演化规律的基础上开展科学预警,在灾害真正发生前发出预警信息,对危险区居民进行疏散避让,保障其生命财产安全。对于非突发性灾害,从理论和技术上均可实现提前预警,但需要进一步推广应用,使地质灾害监测预警工作逐步进入业务化运行阶段。

6)地质灾害具有“三性”特征。一是存在的客观性,地质灾害会一直存在,人类要学会与灾害共生共处。二是认知的局限性,人类还无法发现所有隐患,更无法彻底消除灾害隐患。三是防灾的长期性,地质灾害防治是一场持久战,很难一劳永逸,只能踏踏实实做好防灾减灾工作,不断降低灾害风险。

参 考 文 献

- [1] Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and Modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée Landslide Using SAR Interferometry[J]. *Tectonophysics*, 1997, 265(3-4): 181-190
- [2] Hilley G E. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis[J]. *Science*, 2004, 304(5 679): 1 952-1 955
- [3] Zhao C, Lu Z, Zhang Q, et al. Large-Area Landslide Detection and Monitoring with ALOS/PALSAR Imagery Data over Northern California and Southern Oregon, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 348-359
- [4] Wasowski J, Bovenga F. Investigating Landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi-temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives[J]. *Engineering Geology*, 2014, 174(8): 103-138
- [5] Sun Q, Zhang L, Ding X L, et al. Slope Deformation Prior to Zhouqu, China Landslide from InSAR Time Series Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 45-57
- [6] Dai K, Li Z, Tomás R, et al. Monitoring Activity at the Daguangbao Mega-landslide (China) Using Sentinel-1 TOPS Time Series Interferometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 501-513
- [7] Liao Mingsheng, Wang Teng. Time Series InSAR Technology and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 2014(廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014)
- [8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2 202-2 212
- [9] Zhang L, Lu Z, Ding X, et al. Mapping Ground Surface Deformation Using Temporarily Coherent Point SAR Interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 429-439
- [10] Liao Mingsheng, Zhang Lu, Shi Xuguo, et al. Methodology and Practice of Landslide Deformation Monitoring with SAR Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2017(廖明生, 张路, 史绪国, 等. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017)
- [11] Dong J, Liao M, Xu Q, et al. Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-temporal Satellite SAR Interferometry: A Case Study of Danba County in the Dadu River Basin[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109
- [12] 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
- [13] Liu X, Zhao C, Zhang Q, et al. Multi-temporal Loess Landslide Inventory Mapping with C-, X- and L-Band SAR Datasets—A Case Study of Heifangtai Loess Landslides, China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1 756
- [14] Costantini M, Ferretti A, Minati F, et al. Analysis of Surface Deformations over the Whole Italian Territory by Interferometric Processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed Radar Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 250-275

- [15] Xu Qiang, Li Weile, Dong Xiujun, et al. The Xinmocun Landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and Failure Mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 17-33(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): 17-33)
- [16] Fan X, Qiang X, 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
- [17] 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)
- [18] 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
- [19] Dong J, Zhang L, Li M, et al. Measuring Precursory Movements of the Recent Xinmo Landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 Datasets[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 135-144
- [20] Xu Qiang, Tang Minggao, Huang Runqiu. Monitoring, Early Warning and Emergency Disposal of Large Landslides[M]. Beijing: Science Press, 2015(许强, 汤明高, 黄润秋. 大型滑坡监测预警与应急处置[M]. 北京: 科学出版社, 2015)

Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards

XU Qiang¹ DONG Xiujun¹ LI Weile¹

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

Abstract: In China, traditional methodology on early detection of natural terrain to landslides is challenging as zones most prone to slope failure are usually inaccessible due to high location and dense vegetation. This can lead to underestimation of potential landslide events to the degree of wrongly identifying unstable areas as stable. This paper provides a solution for these cases by proposing an integrated space-air-ground investigation system that allows for the early detection, real-time prediction, and warning of catastrophic geohazards. Firstly, high-resolution optical images and interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data from satellites are employed to obtain a global panorama of a region, highlighting these problematic locations; yet results are detailed enough to provide reliable estimates of deformations at particular points along time spans of days and weeks. As consequence, it makes the compilation of long displacement time-histories feasible, contributing to the understanding of long-term landslide-driving phenomena in regions where it has been underestimated. This is called the general investigation. Then, detailed assessments can be done through the development of unmanned aerial vehicles (UAV) for elaborating high-resolution relief maps and photogrammetric representations based on both visual images and light laser detection and ranging (LiDAR) data. The system finally allows for precise tagging of locations that warrant real-time site monitoring of displacements using global navigation satellite system (GNSS) and crack gauges, validating expecting behavior of these critical, but previously hidden hazardous locations. The overall approach makes it possible to establish a four-level comprehensive early warning system, which meets the urgent needs of the country and promotes a practical and operational application of such system in the field of geohazard prevention.

Key words: geohazard; early detection; monitoring and warning; space-air-ground investigation system; InSAR; LiDAR

First author: XU Qiang, PhD, professor, specializes in the theories and methods of geological disaster prevention. E-mail: xq@cudt.edu.cn

Foundation support: The National Innovation Research Group Science Fund, No. 41521002; the Major Scientific and Technological Fund of Sichuan Natural Resources Department, No. KJ-2018-21; the Funds of Sichuan Science and Technology Support Plan, No. 2018SZ0339.