

藏东南艰险地区地质灾害调查思路与方法论述

陈 龙^{1,2}, 王军朝^{1,2}, 李元灵^{1,2}, 张佳佳^{1,2}, 高 波^{1,2}, 张钊荣^{1,2}

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734; 2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川 成都 611734)

摘要:地质灾害调查自 20 世纪 90 年代以来经历了多轮发展,目前演变为以孕灾背景调查和隐患点识别的灾害地质调查。“藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查”项目工作区位于西藏东南部,有工作程度落后、地质环境脆弱和工作条件恶劣等特点。项目主要从详实基础地质数据、地质灾害规律和孕灾背景调查评价和地质灾害隐患点识别等 3 个方面重点进行灾害地质调查工作。为了在藏东南特殊的环境中实现这些调查要求,应用了野外调查数据采集系统、InSAR、三维激光扫描、无人机航测遥感系统和简易观测等技术方法。并且总结了各类调查技术方法的适用性。通过总结经验 and 找到不足,从而为今后该地区的调查评价提供借鉴和参考。

关键词:藏东南;地质灾害调查;调查方法

中图分类号:P642 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0058-07

Research Ideas and Methods for Geological Hazards Survey in Southeast Tibet/CHEN Long^{1,2}, WANG Jun-chao^{1,2}, LI Yuan-ling^{1,2}, ZHANG Jia-jia^{1,2}, GAO Bo^{1,2}, ZHANG Zhao-rong^{1,2} (1.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2.Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The geological hazard survey has undergone several rounds of development since 1990s, and now it has evolved into a disaster geological survey based on the disaster-formative background investigation and hidden danger identification. Southeast Tibet second-level project is located in southeastern Tibet with the characteristics of inadequate geological work, fragile geological environment and poor working conditions. The project mainly focuses on 3 aspects of the detailed geological data, the law of geological disasters and the evaluation of the disaster-formative background and hidden danger identification. In order to achieve these requirements in the special environment of southeastern Tibet, the field survey data acquisition system, InSAR, 3D laser scanning, UAV aerial survey remote sensing system, simple observation and some other technical methods are applied. The applicability of various survey techniques is also summarized. By summing up experience and finding deficiencies, the reference for future investigation and evaluation in this area can be provided.

Key words: Southeast Tibet; geological survey of geo-hazards; survey methods

1 地质灾害调查历史演变

我国在 1999—2008 年完成了 2020 个山地丘陵区县(市、区)的 1:100000 地质灾害调查与区划,覆盖国土面积约 800 万 km²,发现地质灾害及隐患点 24 万多处,基本摸清了我国地质灾害发育状况,划分了地质灾害易发区,建立了以县为单元的县、乡、村、组地质灾害群测群防体系^[1]。2005 年启动的 1:5 万崩塌、滑坡、泥石流地质灾害调查,在地质灾害多发的县(区、市)开展了比例尺更大、精度更高的调查。基本查明了我国地质灾害及隐患点的分布规律,为编制全国和地方地质灾害防治规划提供了科

学依据。

全国各省根据自身地质灾害特征,2010 年至今相继开展了以 1:5 万为工作单元,以县级行政单元为调查范围的地质灾害详查工作^[2-4]。2013 年以来中国地质调查局组织在地质灾害高易发区,选择人口密集的中小流域等地区,以 1:5 万国际标准图幅为基本工作单元,启动了更加注重孕灾地质背景和工程地质条件调查的崩塌滑坡泥石流灾害调查,由铺面全覆盖调查评价转向具有典型性或代表性的地质灾害高易发区的调查评价,从“就灾论灾”的地质灾害调查转向地质灾害隐患与孕灾地质条件的综

收稿日期:2018-07-01

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查”(编号:DD20160279)、“巴中地质灾害调查与监测”(编号:1212011220171)

作者简介:陈龙,男,汉族,1988 年生,岩土工程专业,硕士,主要从事地质灾害调查评价和监测预警研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,ryandf_lcl@163.com。

合调查^[5]。

中国地质调查局新一轮灾害地质调查区别于县市 1:5 万地质灾害详查工作,其总体目标是以支撑国家战略对地质灾害调查工作的需求,服务地方地质环境管理、防灾减灾工作为根本,开展地质灾害及隐患点调查,重点加强孕灾地质条件调查,隐患点早期识别和极端环境下地质灾害的风险评价,在编制地质灾害易发性和危险性评价图件基础上,充分借鉴国内外风险评价和管理的理念^[6-7],进行风险评价工作,提出地质灾害综合防治对策建议,为地方防灾减灾工作切实服务。

2 藏东南艰险地区的特点

2.1 工作程度滞后

藏东南地区地质灾害工作起步较晚、进度较慢,地质灾害的调查研究、风险评价、监测预报、工程防治等工作滞后,大大降低区内防灾减灾的成效。同时,以往的区域地质工作调查以中小比例尺为主,自 2016 年开展藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查二级项目之前,1:5 万以上大比例尺区域地质工作仍属空白。

2.2 工作区地质环境脆弱

调查区地跨冈底斯陆块、雅鲁藏布江结合带、东喜马拉雅构造结(the Eastern Himalayan Syntaxis)。处于欧亚、印度大陆及缅甸地块的交汇点^[8-9],是喜马拉雅造山带的东端。该地区是整个喜马拉雅造山带中构造应力作用最强、隆升和剥落速率最快、新生代变质和深熔作用最强的地区^[10]。区内沉积作用类型复杂、岩浆活动强烈、变形变质作用发育,第四系堆积物类型丰富。复杂的地质作用形成了复杂的地层岩性,区内地层区划分为喜马拉雅地层区和冈底斯—念青唐古拉地层区;地层年代自前震旦系至白垩系皆有出露。第四系堆积物按照成因有冰碛物,冰水堆积物,冲积物,洪积物,崩坡积物等等。其中第四系冰碛发育,主要为倒二冰期、末次冰期(25000~10000 aB.P.)、新冰期(3500~1000 aB.P.)和小冰期(400~200 aB.P.)的冰碛物^[11]。

调查区强烈的多期次构造变形变质作用,使岩体相互挤压破碎或位移,形成了大量断层、节理等结构面。主要断裂有雅鲁藏布江断裂、嘉黎断裂、墨脱断裂等,这些断裂构成近南北向或北北东向的剪切拉张断裂构造带,形成于第四纪初期,晚第四纪以来

活动十分明显。由于这些断裂均处于高山峡谷中,工作条件恶劣,对这些地区的研究起步也比较晚,研究程度相对较低。调查区位于波密—墨脱活动构造带^[12],属青藏高原南部地震区,地震烈度为 9 度。地震活动周期是 35~40 年^[13]。

调查区降水丰富,帕隆藏布与雅鲁藏布交汇处和拉月曲一带降水丰沛,多年平均降水可达 1100~1400 mm,波密年降水超过 900 mm,然乌一带年降水超过 700 mm;倾多一带因处于背风坡,多年平均降水为波密的一半左右。受印度洋暖湿气流控制调查区地形雨现象显著,并且在帕隆藏布流域集中分布着当今我国最大的海洋性冰川群^[14]。

特殊的地质环境孕育了许多地质灾害,调查区内泥石流、滑坡、崩塌、溜砂坡各类地质灾害频发,通过对前人研究成果分析及现场调查发现泥石流滑坡多发生在降雨量大的波密至鲁朗段,溜砂坡则集中在比较干旱的然乌至松宗段^[15]。

2.3 工作条件恶劣

藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查二级项目 2016—2018 年调查地区为西藏自治区林芝市川藏公路(G318)沿线和林芝市下辖六县一区的城镇周边核心区域(图 1)。该段地貌复杂,主要有高山峡谷地貌、冰川地貌和河流侵蚀堆积地貌等,调查区海拔为 2700~5500 m,调查区常年云雾萦绕降水丰富,斜坡植被茂密,早晚气候寒冷且日间紫外线强烈,给现场调查和遥感解译带来了诸多困难(图 2)。

3 灾害地质调查思路(见图 3)

为了适应灾害地质调查要求,地方政府和交通干线建设的需求,结合藏东南地区的特点,藏东南项目野外调查工作主要从详实基础地质数据,地质灾害规律和孕灾背景调查评价,隐患点识别 3 个方面展开。

3.1 详实基础地质数据

调查区内 1:5 万地质调查工作前期为空白,目前川藏高速公路和川藏铁路规划通过 2016—2018 年项目一般调查区,尽管高速公路和铁路主要依靠桥梁和隧道通过调查区,但仍然有很长一段需要通过帕隆藏布河谷,工程建设时非常关注河谷内的各类第四系堆积体稳定性。对 G318 沿线和重要城镇地质构造和第四系地层进行了细致划分,共圈定了第四系地层界线 9 类 456 处,面积合计 530.50 km²。

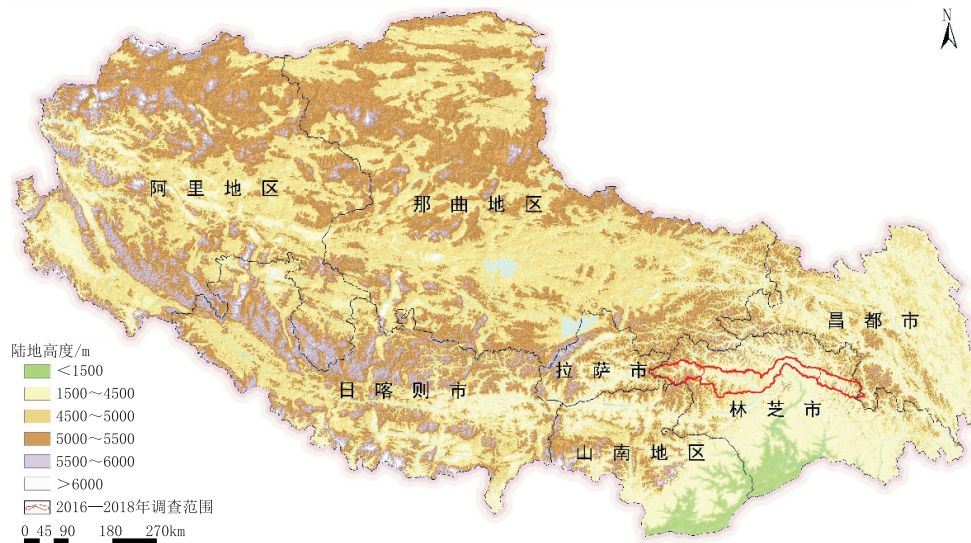


图1 调查区地形图



图2 调查区典型地形地貌

对第四系的冰碛物、泥石流堆积物、冲洪积物、大型的(古)老滑坡堆积物等的空间分布进行了更为细致的划分与界定;统计了区内岩体的节理裂隙数据 68 组,并获取了大量的岩土体物理力学参数。以遥感解译为主圈定物源 4 类 1343 处(其中新提出一种冰碛型物源)。

除了区域的第四系调查,还选取了索通平台,雪瓦卡平台等典型第四系堆积平台进行专项调查,采用了地面测量、钻探、物探、槽探等手段,从研究第四系平台成因和物质分层着手,揭示了其历史演化过程和工程地质特性(图 4),最终判断其在人类工程活动后的稳定性,给出选线建议和施工建议。

3.2 地质灾害规律和孕灾背景调查评价

通过野外实地调查,2016—2017 年共调查地质灾害点 278 处,其中滑坡 42 处,崩塌 77 处,泥石流 121 处,主要威胁对象为林芝市巴宜区、波密县、米林县、墨脱县、朗县几个重要城镇与交通干线 G318 及公路沿线聚居点和分散农户,威胁财产约 5.89 亿元。

首先,剖析已经发生的灾害点,运用工程地质类比法,研究区域地质灾害规律,将各类地质灾害分类分段。基于现场调查,结合无人机、遥感分析和 IN-SAR 解译,发现滑坡崩塌灾害具有典型分段特征,按照川藏公路 G318 沿线不同区段崩塌、滑坡的斜坡结构、地层岩性、风化程度等因素的区别,研究不同段滑坡和崩塌灾害的孕灾地质背景和成灾模式。可以将调查区主要分为五段,分别是仲萨乡至一河镇段,巴河镇—更章门巴民族乡段,更章门巴民族乡段

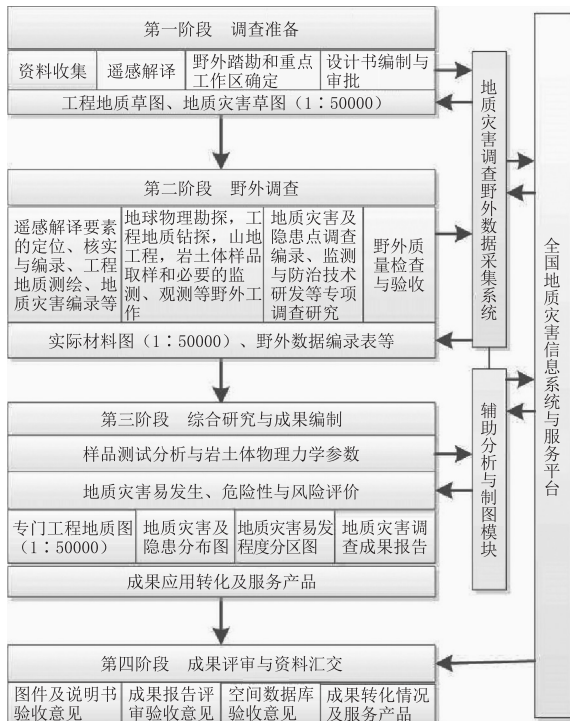


图3 1:5万地质灾害调查工作流程^[16]

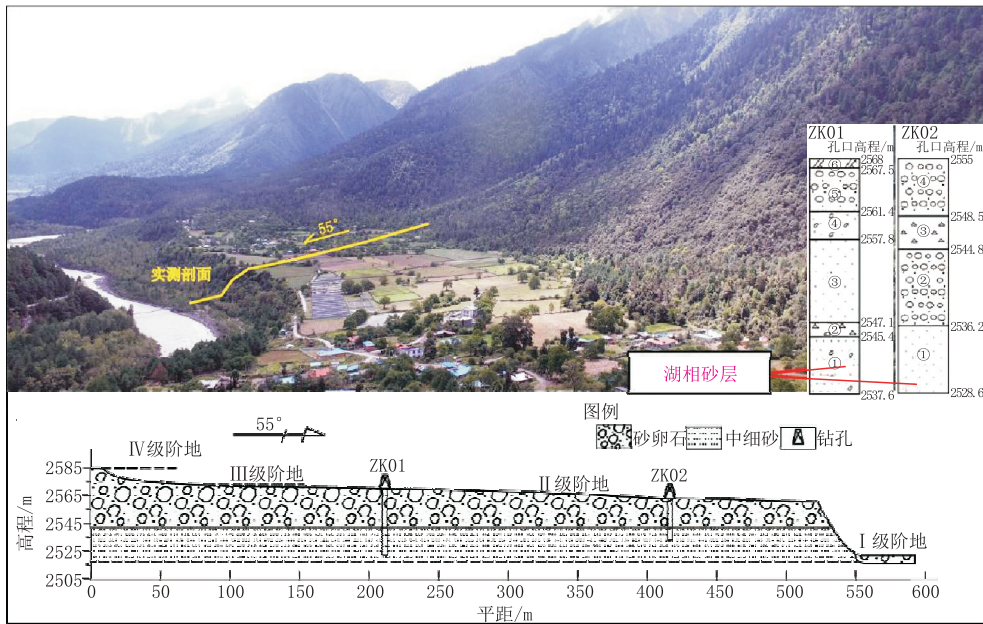


图 4 雪瓦卡阶地下伏的湖相沉积^[17]

一拉月段,拉月—排龙段,排龙—波密段。每一段滑坡崩塌灾害孕灾背景不同,形成机制也不尽相同,通过绘制长剖面 and 概化模式图的方法研究每一段的灾害特征。泥石流特征研究基于大量前人学术成果,按照水源补给来源不同划分为 3 类泥石流,分别为冰川型泥石流,冰川—降雨型泥石流和降雨型泥石流。每一类泥石流由调查区内典型沟道绘制了三维形成机制模式图。

其次在查明规律的基础上,开展了针对孕灾背

景的专题调查和研究工作。泥石流方面,从水源、物源和地形 3 个方向研究孕灾背景。水源方面:第一、通过收集和遥感解译进行调查区冰川编目的校核工作,统计出调查区内全部冰川,获取冰川参数;第二、在区域建立不同位置,不同高程的气象简易观测站(图 5),收集降雨参数,分析区域地形雨特征,在个别冰川下游沟道内进行径流简易观测,分析温度与冰川融水的相关性;第三、通过 InSAR 分析冰川多年的厚度变化和运动趋势。物源方面,运用遥感

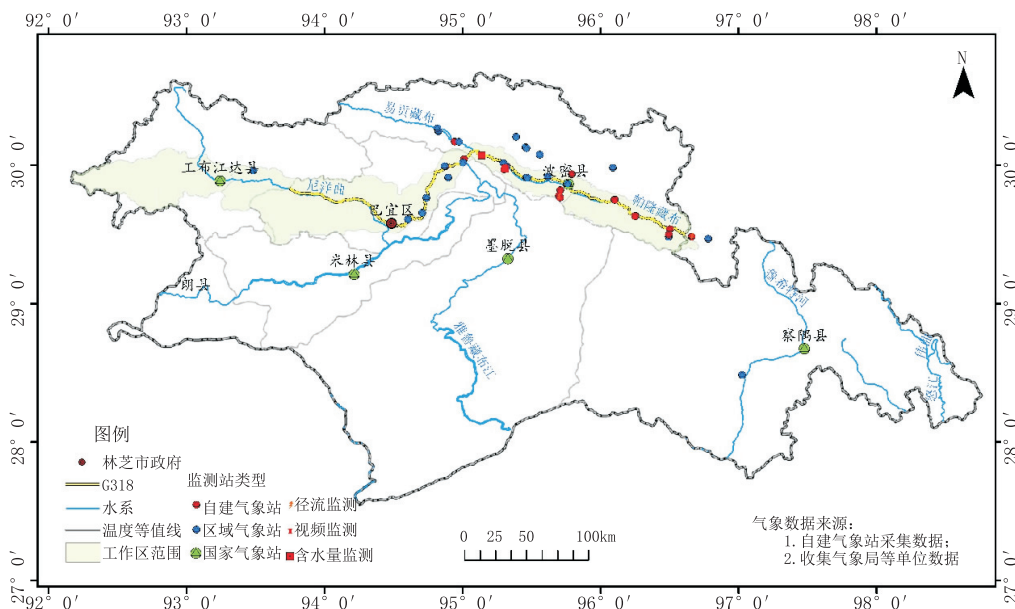


图 5 各类气象站位置分布图

和现场复核详细勾绘了4类泥石流物源,并且初步建立了物源估算方法。地形方面,调查区北岸和南岸具有典型差异,北岸沟谷多呈漏斗状,下游沟谷为V形谷;南岸泥石流流域多呈柳叶状,沟谷为宽U形谷。项目组由流域形态数入手,建立量化指标定义不同沟谷形态。

滑坡崩塌方面,从宏观和微观两个尺度进行孕灾背景研究。宏观上,从构造控制,冰川改造和风化剥蚀的角度研究地形地貌的演化;微观上,运用测窗法分期配套节理裂隙,确定斜坡结构,研究斜坡稳定性。

最后,结合多种因素进行地质灾害风险评价。将斜坡结构,斜坡坡度,灾害地质岩组,降雨量等各单因素孕灾因素栅格化,通过风险评价模型,按照不同权重逐一叠加计算,最终得出根据灾害地质调查形成的一系列风险评价图件。

3.3 地质灾害隐患点识别

地质灾害隐患点识别是学术前沿难题,藏东南项目主要采用2种方法探索地质灾害隐患点的识别。滑坡崩塌灾害是从典型灾害点入手,运用工程地质类比法结合区域构造运动的整体趋势和断层、节理的发育展布,对应调查区内的地层岩性和地貌特征,逐步缩小隐患点识别范围,实现“聚焦靶区,精确识别”的目标。泥石流灾害是建立定量可操作有效的风险评价模型,并且通过泥石流事件校核模型,从而判断泥石流隐患点。

4 方法论述

由于藏东南项目开展位置特殊,调查工作条件恶劣,项目组尝试了多种新技术新方法,探索了多种调查技术方法,例如:野外调查数据采集系统、InSAR、三维激光扫描、无人机航测遥感系统和简易观测等。工作中积累了实际操作过程中的经验,可以为日后在该地区进行调查工作提供参考。

4.1 新技术新方法取得成效

率先使用野外调查数据采集系统进行填图,结合激光测距仪现场精确测量数据,所有数据格式满足数据库建设需要,实现数据野外填写整理后一次到位,后期现场调查数据可以直接进入地质云。实现了数字化填图,简化了长期以来大量的野外手写,室内进行电子化的繁琐过程。

InSAR变形监测结合地形地貌、光学影像等信

息能够识别地表变形,对地面调查有着重要的指导意义^[18]。使用了InSAR解译冰川厚度和冰川运动趋势的变化。首先在美国地质调查局(USGS)官网查询本地区Landsat存档影像情况。查询发现1999年9月23日拍摄的Landsat7 ETM+影像和2015年7月25日拍摄的Landsat8 OLI影像在本地区云层和季节性积雪较少,适合提取冰川边界。下载影像后,统一将Landsat7 ETM+和Landsat8 OLI的波段。然后将波段融合,分别得到两期分辨率为15m的真彩色影像图。对融合彩色影像进行对比度和色阶拉伸,使影像颜色更接近于真彩色。将冰川初始边界值先矢量化,然后叠加到拉伸过后的融合影像上进行人工编辑。参考实地拍摄的天摩沟全景像片,通过地物对比判断确定冰川末端在融合影像上的外观。去除研究区域以外的冰川边界。并将编辑后的冰川边界按起始和末端位置、朝向等分成若干个冰川。通过对天摩沟冰川流速研究发现,郭东隆巴沟和天摩沟两处冰川的流速要远高于周围的冰川,包括面积比其大得多的,表明这两处的冰川活动性很强(图6)。

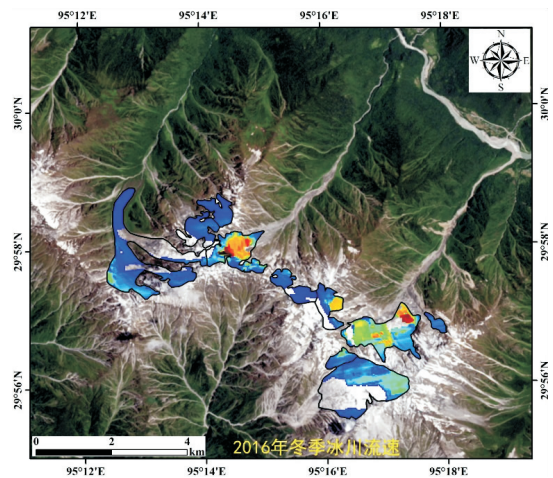


图6 研究区冰川流速分布图

三维激光扫描技术在岩体、地质工程领域获取空间数据时,具有快速、高效、精确和高分辨率的特性,是传统测量、调查方法不可比拟的^[19]。充分利用三维激光扫描精准快速测量地形的优点,2017年7月10日至20日,运用三维激光扫描仪对位于西藏自治区林芝市波密县川藏公路102隧道外侧的102滑坡进行了三期三维激光扫描。扫描范围为102滑坡形成的坡面泥石流中下游,主要扫描内容为沟道地形,拟通过三期扫描获取的地形对比,获取

坡面泥石流下切深度和下切速率。

无人机航测遥感系统是继卫星遥感和有人驾驶飞机遥感之后的一种新型航空遥感监测系统,是航空、信息、自动化控制、微电子、计算机、通讯、导航、传感器以及“3S”等多学科、高新技术的集成应用,具有机动、快速、灵活、影像分辨率高等特点。目前,利用无人机在进行航空摄影测量及其影像处理的应用已经非常广泛^[20-25]。藏东南地区山高坡陡,植被茂密,泥石流形成区与沟口高差常常可以达到 1000~3000 m,对泥石流流通区和形成区的调查研究,必须要大量运用无人机航拍,并且通过卫星遥感和现场复核才能进行泥石流物源的精细解译。2017 年项目组进行遥感解译 1343 处泥石流物源点,类型分别为崩滑型物源、沟道侵蚀型物源、坡面型物源和冰碛型物源 4 类。大量细致的泥石流物源遥感解译,为泥石流调查评价打下了扎实的基础。

为弥补区域气象水文资料匮乏的不足,布设 3 条观测剖面(图 4),建立不同高程及整个流域温度、降水量分布模型。安装简易雨量观测仪、含水量和径流量观测传感器埋设,获取现场第一手数据,研究各因素及其变化与地质灾害的相关性,通过 2 年的观测证实了帕隆藏布河谷降雨特征,并提出量化指标;可获得该区域相对准确的降雨分布,为后续开展其他工作提供基础数据支撑;可为泥石流的易发性分析及预警预报提供依据。

4.2 技术方法适用性简述

藏东南项目主要采用了高精度遥感影像解译、工程地质测绘、地质灾害调查、工程地质勘查与试验、三维激光扫描和无人机航空影像等主要手段,经过 2 年的工作经验总结各类调查技术方法在藏东南地区的适用性(见表 1)。

表 1 调查技术方法

调查内容	技术方法	技术方法特点	优缺点
地形测绘	大地测量法(视准线法、前方交会法、极坐标法)	投入快、精读高、监测范围大、直观、安全、便于确定滑坡位移方向及变形速率	适用于不同变形阶段的位移监测;受地形通视和气候条件影响,不能连续观测
	近景摄影测量法	精度高、速度快、自动化程度高,易操作,省人力,可根据自动连续观测,监测信息量大	适用于不同变形阶段的位移监测;受地形通视条件的限制适用于变形速率较大的滑坡水平位移及危岩陡壁裂缝变化监测;受气候条件影响较大
	三维激光扫描系统	监测信息量大、省人力、投入快、安全、但精度相对较低	适用于变形速率较大的边坡水平位移及危岩陡壁裂缝变化监测;受气候条件影响大
	三维激光扫描系统	精度高、速度快、自动化程度高,目前成本较高,发展前景可观	适用于不同变形阶段的位移监测;受地形通视条件的限制较小,当植被茂密和有积水时影响数据精度;受天气条件影响较大
地质测量	地面踏勘	实现面状调查,有利于描述平面岩性范围,可以精细表达平面地貌特征	适用于区域地层范围描述,断层性质描述不直观
	实测剖面 测窗法	实现线状调查,便于表达斜坡演化过程和灾害成因机制 实现点状调查,可以精细描述厚层第四系堆积体的颗粒结构;可以精细描述基岩露头的产状和结构面,有利于支撑斜坡结构	适用于描述崩滑成因机制和泥石流沟道特征,测量角度为平面,跟三维地质模型相比较抽象,不直观 适用于基岩和厚层堆积物的调查,测量范围小
山地工程	钻探	可以较好地揭露地下深部物质组成	适用于揭露深部物质。在巨厚层冰碛物和冰水堆积物中取心困难
	槽探	可以三维的全面揭示物质接触关系	适用于揭露浅表层物质,开挖深度受限
物探	高密度电阻率法测量	高密度电法野外数据信息采集量大,一次性布设电极,大大减少了数据采集的人为误差	适用于基岩界面的判断;受地下水影响较大,物质差异较小处解译效果有限
	高分一号	回归周期 41 d,重访周期 4 d,全色精度 2 m+8 m,多光谱精度 16 m,幅宽 60 km	价格便宜,受天气影响较大,植被覆盖好的地区使用效果受到限制
遥感	Spot6	全色精度 1.5 m,多光谱精度 6 m,幅宽 60 km	价格中等,受天气影响较大,植被覆盖好的地区使用效果受到限制
	WorldView3	全色精度 0.3 m,多光谱精度 1.38 m	价格贵,受天气影响较大,植被覆盖好的地区使用效果受到限制
	InSAR	全天候、大范围、高精度、高分辨率、能够监测人员无法进入的区域,监测成本低	适用于不同变形阶段的位移监测;受地形通视条件的限制较小,可在植被丰富地区工作,受气候条件影响较大
简易观测	简易雨量观测	全天候工作、安装简便,用电低,存储数据能力强,不限于网络信号	价格低廉,用电量低,续航能力强,无法远程传输数据
	Birdcam 拍照观测	全天候工作、安装简便,用电低,存储数据能力强,不限于网络信号	价格适中,续航能力中等,无法长时间不间断摄像,无法远程传输数据,受气候条件影响较大
	含水量观测	全天候工作、安装简便,用电低,存储数据能力强,不限于网络信号	价格低廉,用电量低,续航能力强,无法远程传输数据
	径流量观测	全天候工作、安装简便,用电低,存储数据能力强,不限于网络信号	价格低廉,用电量低,续航能力强,无法远程传输数据
	温度观测	全天候工作、安装简便,用电低,存储数据能力强,不限于网络信号	在紫外线强烈地区,须增加防辐射罩才能保证效果

5 结论

由于藏东南艰险的调查环境,项目实施过程中试用了各类技术方法,积累了大量实际工作的经验,同时存在着很多不足,主要有以下两点。

(1)调查方法和技术创新能力不足。

很多调查方法的创新都得益于学科交叉,学科交叉往往可以碰撞出新的火花,在后面的调查工作中要多交流多总结多试用,不断大胆创新调查手段;另外,现有调查方法的创新挖掘新技术的能力也需要提高,在现有调查方法中深化调查技术研发,由人工化向智能化方向发展。例如遥感解译的发展就是由人眼进行图像识别向着人机交互识别再向着利用智能图像识别的方向不断进步。

(2)国内外学术前沿动态掌握不足。

行业的发展和变化日新月异,科研人员需要大量的合作和交流以便于能够很好地了解整个行业的动态;通过合作和交流也可以开拓视野,增长见识,为项目立项和深度合作打下基础。

随着科技的不断进步,信息时代逐渐向着大数据智能化的时代迈进,地质调查领域必然也需要越来越多的“地质智慧”。从目前的调查手段来看,未来调查一定是“空天地深”四位一体的调查体系,调查可以形成较为准确的三维地质模型;在评价方面,也可能逐步从灰色数学方法演化为人工智能算法。通过调查和地质灾害四大体系建设为“智慧中心”收集大数据,运用人工智能等最新的算法来进行地质灾害的评价。

参考文献:

- [1] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,(2):32-37.
- [2] 张茂省,孙传尧,校培喜,等.延安市宝塔区地质灾害详细调查示范[J].西北地质,2007,(2):29-55.
- [3] 姚春梅,高峰,刘善军,等.山东省山丘区1:5万地质灾害调查成果综述[J].山东国土资源,2013,29(9):91-94.
- [4] 赵蕾.发挥技术支撑作用为“生命工程”保驾护航——四川省地质环境监测总站全力保障地灾详查工作纪实[J].资源与人居环境,2015,(12):18-20.
- [5] 郝爱兵,石菊松,乐琪浪,等.坚持示范引领定位从地质灾害调查走向灾害地质调查[J].水文地质工程地质,2017,44(6):3.
- [6] 张茂省,唐亚明.地质灾害风险调查的方法与实践[J].地质通报,2008,(8):1205-1216.
- [7] 唐亚明,张茂省,李政国,等.国内外地质灾害风险管理对比及评述[J].西北地质,2015,48(2):238-246.
- [8] Holt W. E., Ni J. R., Wallace T. C., et al. The active tectonics of the eastern Himalayan syntax is and surrounding regions [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1991, 96: 14595-14632.
- [9] Zhang J. J., Ji J. Q., Zhong D. L., et al. Structural pattern of eastern Himalayan syntaxis in Namjagbarwa and its formation process [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2004, 47(2):138-150.
- [10] 刘焰, Wolfgang SIEBEL, 王猛.东喜马拉雅构造结陆内变形过程的研究[J].地质学报,2006,80(9):1274-1284.
- [11] 曾庆利.巨厚松散堆积体发育条件、成因模式及防治对策——以川藏公路然乌至鲁朗段为例[D].北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2007.
- [12] 丁林,钟大赉.西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义[J].中国科学(D辑),1999,29(5):385-397.
- [13] 韩同林.西藏活动构造[M].北京:地质出版社,1987.
- [14] 李吉均,苏珍.横断山区冰川[M].北京:科学出版社,1996.
- [15] 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,西藏自治区交通科学研究所.川藏公路典型山地灾害研究[M].四川成都:成都科技大学出版社,1999:1-210.
- [16] 崩塌滑坡泥石流地质灾害调查与风险评估技术要求(试用稿)[S].
- [17] 张佳佳,王军朝,陈龙,等.川藏公路扎木到索通段第四纪堆积体的分布及产出特征[J].科学技术与工程,2017,17(32):37-43.
- [18] 刘星洪,姚鑫,周振凯,等.滑坡灾害InSAR应急排查技术方法研究[J].地质力学学报,2018,24(2):229-237.
- [19] 董秀军.三维激光扫描技术及其工程应用研究[D].四川成都:成都理工大学,2007.
- [20] 金鼎坚,支晓栋,王建超,等.面向地质灾害调查的无人机遥感影像处理软件比较[J].国土资源遥感,2016,28(1):183-189.
- [21] 王帅永,唐川,何敬,等.无人机在强震区地质灾害精细调查中的应用研究[J].工程地质学报,2016,24(4):713-719.
- [22] 张启元.无人机航测技术在青藏高原地质灾害调查中的应用[J].青海大学学报(自然科学版),2015,33(2):67-72.
- [23] 曾青石,张像源,陈辉.基于3S技术的地质灾害野外调查数字采集系统的研究[J].水文地质工程地质,2008,(1):121-125.
- [24] 付小林,黄学斌,郭希哲,等.“3S”技术整合在地质灾害调查评价中的应用[J].地质力学学报,2004,(1):81-87.
- [25] 张茂省,雷学武,校培喜,等.遥感技术在黄土高原区地质灾害详细调查中的应用[J].西北地质,2007,(3):92-97.