

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.002

滑坡灾害 GNSS 监测技术研究进展与展望

王利^{1,2,3}, 许豪^{1,2,3}, 舒宝^{1,2,3}, 李新瑞^{1,2,3}, 田云青^{1,2,3}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054; 3. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 滑坡灾害在我国分布广泛, 严重威胁着人民生命财产和重大工程设施的安全, 进行滑坡灾害监测是防灾减灾工作的重要环节。全球卫星导航系统(GNSS)因具有全天时、全天候及高精度等技术优势, 目前已广泛应用于滑坡灾害的地表三维形变监测中, 且在监测理论与技术方法等方面取得了长足进展。首先综述了 GNSS 监测设备、高精度监测技术和监测结果时间序列处理等方面的研究进展; 然后, 总结分析了滑坡灾害 GNSS 监测技术所面临的弱信号低成本接收机研制、遮挡环境下模糊度可靠固定及长基线大高差环境下 GNSS 大气误差处理等关键问题与挑战; 最后, 对 GNSS 滑坡监测应用中的监测设备部署、大范围滑坡监测、多传感器位移融合预测及普适化监测云平台构建 4 个方面未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 滑坡灾害; 全球卫星导航系统; 监测; 普适化

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2023)01-0012-15

Research Progress and Prospects of GNSS Deformation Monitoring Technology for Landslide Hazards

WANG Li^{1,2,3}, XU Hao^{1,2,3}, SHU Bao^{1,2,3}, LI Xinrui^{1,2,3}, TIAN Yunqing^{1,2,3}

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Landslide hazards are widely distributed in China, which seriously threaten the safety of people's lives and properties and major engineering facilities, and landslide hazard monitoring is an important part of disaster prevention and mitigation. The Global Navigation Satellite System (GNSS) has been widely used in monitoring the three-dimensional surface deformation of landslide hazards because of its technical advantages of all-day, all-weather and high accuracy, and has made great progress in monitoring theory and technical methods. The paper firstly reviews the research progress of GNSS monitoring equipment, high-precision monitoring technology and time series processing of monitoring results, then summarizes and analyzes the key problems and challenges faced by GNSS monitoring technology for landslide disasters, such as the development of low-cost receivers with weak signals, reliable fixation of ambiguity under obscured environment and the processing of GNSS atmospheric errors under long baseline and large height difference environ-

收稿日期: 2022-11-19; **修订日期:** 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(41872289); 国家重点研发计划(2021YFC3000503); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JQ-230)

作者简介: 王利(1975-), 博士, 教授, 主要从事卫星导航定位测量数据处理和地质灾害变形监测方面的研究。

通信作者: 舒宝(1990-), 博士, 副教授, 主要从事 GNSS 高精度导航定位算法和应用方面的研究。

ment. Finally, the future development trend of GNSS monitoring technology in landslide disaster application, large-scale landslide monitoring, multi-sensor displacement fusion prediction and the construction of universal monitoring cloud platform is foreseen.

Key words: Landslide hazards; GNSS; Monitoring; Universalization

0 引言

我国国土面积辽阔,不同地区地质构造也不尽相同,是一个地质种类非常丰富的国家。丰富的地质种类在带来许多壮丽景观的同时也造就了许多不同种类的地质灾害问题,例如滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝及地面沉降等一系列地质灾害。2011年,国务院印发相关决定,在思想、原则和目标3个要求指导下,开展全面清查隐患情况,积极开展灾害监测预报预警,有效处理、规避灾害风险^[1]。虽然经过多年的工作与努力,我国地质灾害监测、防治及应急体系取得了较好的成果,但每年发生地质灾害的总数依旧较大。据国家自然资源部统计,2021年全国共发生4772起地质灾害,造成80人死亡、11人失踪,与前5年同期平均值相比,地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数分别减少30.3%和63.2%。在各类地质灾害中,滑坡灾害发生最为频繁,造成的生命财产损失也最为严重。长期以来,对滑坡灾害进行监测预警,是有效降低滑坡灾害风险、主动防范滑坡灾害的一项重要工作。

理论上讲,滑坡灾害的发生就是岩土体在地质和重力作用下不断变形直至失稳的过程,不管哪种类型的滑坡灾害,都会表现出一定程度的变形特征。因此,地表形变监测一直是滑坡灾害监测中的重要内容^[2]。长期以来,地表外部位移监测主要依靠经纬仪、水准仪及测距仪等传统仪器,这些以大地测量为主的方法具有直观、简单、投入快及监测较为准确等特点,在滑坡灾害监测中发挥了重要的作用。但这些监测手段也存在人工作业劳动强度高,受人为因素、地形通视和气候环境条件影响大、作业周期长等缺点,难以准确及时发现灾害体的整体变形。随着现代空间技术、电子技术、计算机技术以及网络、通信技术和信息技术的发展,以全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、遥感(Remote Sensing, RS)、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)、全自动测量机器人和远程自动化监测系统为代表的现代高科技技术手段,逐渐成为地

质灾害形变监测的重要技术方法,为地质灾害监测带来了一场全新的技术革命^[3-4]。其中,GNSS技术因具有全球性、全天候、连续性和实时性等特点,已被广泛应用于滑坡灾害的地表三维形变监测中。

近些年,国内外学者在GNSS技术应用于滑坡灾害监测的理论和技術方法等方面开展了大量的探索和研究,主要包括GNSS监测终端、GNSS高精度监测技术及GNSS监测结果时间序列处理等研究领域,取得了诸多的研究成果。但是,由于我国的滑坡灾害种类多、分布广、频次高、强度大、灾情严重,GNSS技术应用于滑坡灾害监测仍然存在着复杂观测环境条件下高精度定位难度大、设备硬件成本高、专业性强、虚警或误警率高及普适化程度低等问题。为此,本文在总结滑坡灾害GNSS监测技术研究进展及现状的基础上,提炼了现阶段研究中存在的关键问题并提出了一些研究思路,对滑坡灾害GNSS监测技术未来的应用发展趋势进行了展望。

1 滑坡灾害 GNSS 监测技术研究进展

全站仪、水准仪测量及近景摄影测量等传统大地测量技术,长期以来在滑坡灾害监测中发挥了重要作用。随着人们对滑坡灾害危害的认识加深及查明的灾害隐患点的增多,人们对滑坡灾害变形状态监测的时效性需求也更高。自20世纪90年代以来,GNSS等空间对地观测技术就凭借其技术优势在滑坡变形监测中得到了广泛应用,取得了较好的效果。GNSS应用于滑坡形变监测,首先需要在滑坡变形区域内布设GNSS监测设备,然后对GNSS监测设备采集到的观测数据进行解算,最后基于长时间解算的三维坐标得到变形时间序列。随着GNSS集成制造工艺技术的进步、数据解算技术的不断迭代更新及时间序列分析理论的发展,GNSS技术在滑坡形变监测中经历了从专业型监测终端到低成本采集模块、从静态mm级精度到动态mm级精度和从线性平稳时序到非线性非平稳时序精细化建模的转变。

1.1 GNSS 滑坡灾害监测设备研究进展

滑坡灾害GNSS变形监测是利用专业GNSS监测设备,对滑坡体在时空域下的变形现象进行连

续监测的工作。滑坡体变形往往具有空间差异性,单个监测点难以掌握滑坡体的整体变形趋势,因此往往需要布设多个监测设备。GNSS监测设备最核心且占据最大成本部分主要由卫星天线、定位模块和通信模块构成,常规测量型GNSS监测设备成本大约数万元每台,在单个或多个滑坡体上布设监测设备不仅硬件成本高,外业安装及硬件调试也会增加一些成本,这是制约滑坡灾害GNSS监测技术大范围普适化推广应用的关键因素之一。已有学者针对GNSS监测设备进行了一系列研究,对于监测系统中使用多个接收机导致成本高昂的问题,有学者提出一机多天线系统,即使用多天线控制器切换信号,利用一台接收机连接多个卫星天线,实现多节点监测。已有研究表明,该方法各监测点在东、北、天3个方向定位精度可以达到mm级、天线信号切换时间低于10ms,但该技术存在信号转换器不稳定、线路布设难及作业不灵活等问题^[5]。此外,GNSS接收机分为单频和多频接收机,虽然单频接收机只能接收GNSS卫星单一频率的载波信号,但定位精度可达cm级,仍可用于变形速率在cm级以上的滑坡灾害监测^[6]。单频接收机的主要优势是成本低,但随着多模多频GNSS接收机成本不断降低,单频接收机的成本优势也相对减弱,且多模多频GNSS接收机获取的观测数据经解算后定位精度可达mm级,可以更加敏锐地捕获滑坡体的形变情况。

GNSS芯片作为GNSS接收机的核心,售价在几百元到几千元不等,是降低GNSS监测接收机成本的关键之一。目前,随着多模多频GNSS芯片成本的不断降低,市场上也开始出现了低成本的多模多频GNSS接收机,单频接收机的成本优势相对地逐渐减弱。目前,国内典型低成本定位模块有和芯星通科技(北京)有限公司的UM980和武汉梦芯科技有限公司的MXT906B等,国外有UBLOX的F9P等,使用上述定位模块研发的监测型接收机整机售价均低于5000元。此外,这些典型的定位芯片大小约2cm×2cm,厚度小于3mm,工作电压2.7~3.6V,部分芯片可达到-148dBm的捕获灵敏度和-167dBm的跟踪灵敏度。目前低成本芯片在体积、功耗及信号捕获跟踪等方面都有着不错的表现,且实验表明一些采用低成本定位芯片制造的GNSS双频接收机具有亚毫米级噪声,并且可以实现与短基线常规测量型接收机相当的测量精度^[7-8]。GNSS纳米芯片工艺与射频基带处理一体化技术,在降低GNSS监测设备成本的同时

可以有效地缩小设备体积,是推动GNSS监测设备在滑坡灾害监测中普适化推广应用的重要一步^[9]。同时,文献^[10]提出了“云存储-云检核-云增强-云计算”的行业云平台数据处理模式,通过剥离测量型GNSS接收机中的非必要功能模块,仅保留数据采集和通信模块,大幅度降低GNSS接收机的成本。低成本终端观测数据质量通常较差,需要将监测点的观测数据流和广播电文数据流在云平台上进行云存储,结合云平台生成的超快速星历产品等对观测数据进行筛选,再进行精细模型改正,定位精度才能满足滑坡监测要求。

GNSS技术在恶劣观测环境时,其造成观测数据的异常可能会导致灾害预警的严重误判。文献^[11]融合北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、GLONASS与强震记录仪进行实时变形监测,模拟变形实验结果表明,结合各传感器的优势,可获取高精度、高频的变形位移、速率及加速度信息。另外,滑坡灾害往往位于高山峡谷区,山势陡峭、地形地貌复杂,现有的GNSS监测设备都是通过人工现场安装,不仅费时费力,而且在遇到突发灾害需要进行监测时具有很高的危险性。为了使GNSS设备具有更好的普适性,长安大学率先研制了抛投式GNSS监测装备^[12],采用无人机抛投的方式进行部署,该设备对GNSS信号质量、接收机质量及硬件成本等方面均提出了新的需求。

1.2 GNSS高精度监测技术研究进展

从1963年第一颗导航卫星成功发射,到2020年我国BDS全面建成,目前GNSS在轨卫星数已超过120颗,GNSS在全球范围内的高精度导航定位能力得到进一步提升^[13]。与此同时,滑坡灾害GNSS监测技术应用研究也是如火如荼,在监测时效性及定位精度方面都得到了很好的提高,可以较好地满足滑坡形变监测的实际需要。回顾GNSS滑坡灾害监测应用的发展历程,滑坡监测工作中所涉及的主要包括静态相对定位、实时动态相对定位(Real-Time Kinematic, RTK)、网络RTK和精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)四类高精度定位技术。

1) 静态相对定位。静态相对定位是从已知或假定已知位置的基准站,用GNSS接收机在基准站和监测站同时对相同卫星进行观测,经载波相位测量处理获得站间基线矢量,进而确定监测站相对于基准站的位置坐标的技术^[14]。经数小时的持续观测,静态相对定位可达mm级定位精度。早在20

世纪 90 年代,就有学者讨论该技术应用于地质灾害变形监测中的可行性。西班牙加泰罗尼亚理工大学和巴塞罗那地理信息研究所于 1995 年开始使用 GPS 静态测量对 Vallcebre 滑坡进行平均 2 个月一次的监测工作,该方法与传统高精度大地测量相比,水平方向精度在 12~16mm 之间,高程方向精度在 18~24mm 之间^[15]。奥地利格拉茨技术大学和奥地利地质调查局于 1999 年对阿尔卑斯山的 Brunnalm 滑坡进行监测并开发了相应的软硬件系统,24h 观测精度可以达到 mm 级^[16]。1997 年,印度尼西亚的万隆科技大学开始用 GPS 静态相对定位技术对雅加达地区的地面沉降进行监测,持续 8 年的监测结果表明,GPS 技术对于地面沉降监测和辅助公共政策决策方面意义重大^[17]。2000 年—2002 年,法国里昂地球科学实验室用单频 GPS 接收机对阿尔卑斯山地区的 La Valette 滑坡进行变形监测,其东西方向、南北方向和垂直方向的最差监测精度分别为 2.4cm、11cm 和 7.4cm^[18]。

我国自 20 世纪 90 年代起也开始在长江三峡等大型水利水电工程中建立 GPS 监测网,用于各种崩塌、滑(边)坡的变形监测;在许多正在施工和运营的道路及工程建筑中也使用 GPS 监测治理或未治理的滑坡。1990 年,湖北省岩崩滑坡研究所和中国科学院测量与地球物理研究所利用 GPS 静态相对定位技术与常规地形变化监测技术相结合,建立了跨长江三峡库区九湾溪断裂和链子崖-新滩滑坡体的 GPS 观测网,这是我国首次利用 GPS 空间测量技术研究区域构造运动与岩崩滑坡的相关性。1990—1993 年间四期的监测结果表明,只要监测网点布设合理、选点恰当、观测严格、数据处理方法正确,该方法是可行、可靠的^[19-20]。进入 21 世纪之后,GNSS/GPS 静态相对定位技术在滑坡等地质灾害监测中的应用也更加广泛。文献[21]通过融合 BDS 和 GPS 观测数据,对西安地区地面沉降进行监测,明显提高了监测结果的内、外符合精度。目前在良好环境下静态相对定位一般可以达到 10min mm 至 cm 级定位精度,但其事后数据处理模式使得人力和物力耗费大,自动化程度不高。此外,当滑坡变形速率较大时,静态相对定位则难以捕捉到关键形变信息。文献[22]通过 GPS 对甘肃黑方台滑坡进行 30min 一次的变形监测,监测结果显示,滑坡发生 0.5h 前维持变形速率不足 1mm/d 的缓慢匀速变形状态,未能获取到滑坡破坏过程的变形

数据。因此,静态相对定位主要应用于处于相对稳定或缓慢匀速变形状态的滑坡长期变形监测中。

2)实时动态差分定位。实时动态差分定位也是一种相对定位方法。基准站通过数据链将观测值和坐标一起发送给监测站,监测站在接收来自基准站数据的同时也需要采集 GNSS 观测数据,组成差分观测值进行处理后实时给出定位结果^[23]。由于 RTK 技术可消除接收机钟差、卫星钟差等公共误差,并削弱对流层延迟、电离层延迟等强相关误差,定位精度可快速达到 cm 级甚至 mm 级,是目前滑坡灾害变形监测应用最为广泛的 GNSS 监测技术。文献[24-25]结合某类滑坡的物理模型实验,利用 GPS RTK 技术对滑坡变形过程进行监测,当基准站及监测站同步观测卫星数在 7 颗以上且数据链正常工作时,在良好观测环境下 RTK 测量精度可控制在平面精度 15mm 以内,高程精度 20mm 以内。目前 RTK 在良好观测环境下能够实时获得平面和高程分别为 5mm 和 10mm 的定位精度,但滑坡灾害区域往往存在山体遮挡、植被茂密的问题,导致实时监测结果的精度和可靠性不能保证^[26]。针对监测站观测环境差的问题,有学者通过剔除较差的观测值或降低权重的方法来抵御多路径效应。文献[27]结合监测站地形特征与 GNSS 卫星空间位置的几何关系,建立基于方位向的截止高度角处理策略,相较传统处理模型水平方向和高程方向的精度均有一定程度的提升。文献[28]基于短距离内基准站与监测站观测数据间的相关性,通过站间观测数据信噪比差分的方法识别并剔除受多路径影响严重的观测数据,实验结果显示该方法可以提升平均模糊度固定率及定位精度。

使用 RTK 对滑坡灾害进行实时的变形监测依赖稳定的通信数据链。GNSS 实时数据在通过网络传输的过程中会不可避免地产生时延^[29]。文献[30]评估了基于网络传输同步 RTK 的时延,结果显示 1Hz 的数据在传输过程中最高时延可达 3s。当基准站数据发生时延时,RTK 无法实时提供变形信息,这对关键变形阶段的滑坡灾害变形监测而言是难以接受的。文献[31]提出了一种异步 RTK 精密差分定位算法,分析了异步数据中星历、电离层及对流层等误差对定位的影响,结果表明在十几秒内上述误差可以忽略。文献[32]通过高精度精密星历和钟差改正,发现异步 RTK 与同步 RTK 间的累积误差在短时间内线性增长,经过一次多项式修正模型修正该趋势后,

基准站发生时延 1min 内仍可提供 cm 级监测精度。短基线 RTK 之所以可实时得到监测站的高精度三维空间坐标,是因为 2 个距离较近的 GNSS 观测站的大气误差近似相等,可以通过双差观测值消除大部分的公共误差。然而,当基准站与监测站距离增加时,二者大气误差相似性降低,会导致定位精度显著降低甚至定位结果不可用,因此一般要求基线距离不超过 15km^[33]。在 RTK 滑坡监测工作实施过程中,每个滑坡灾害区域通常需要单独建设独立的基准站,这种“一点一基站”的监测模式不仅增加了监测成本,还可能

存在监测基准不稳定的问题^[34]。

3) 网络 RTK。网络 RTK 技术利用区域内多个基准站数据,对基准站模糊度固定后的大气延迟误差进行建模,并将改正信息播发给区域内的流动站,进而实现大范围的高精度实时定位^[35]。与常规 RTK 技术相比,网络 RTK 技术具有监测范围广、无需布设基准站等明显优势^[36]。此外,网络 RTK 建设投资少,可为区域内的多个滑坡灾害点提供监测服务。网络 RTK 的关键技术是充分利用基准站网提供的信息来改善监测站的定位精度和可靠性等,目前主要包括区域改正数(Flächen Korrektur Parameter,FKP)、虚拟基准站(Virtual Reference Station,VRS)、主辅站(Master Auxiliary Concept,MAC)等方法。文献^[37]通过模拟位移实验,对上述三种网络 RTK 方法的定位精度进行了评估,与干涉仪(0.1mm 位移精度)对比的结果表明,网络 RTK 的均方误差在水平方向和高程方向分别为 4.7mm 和 7.9mm,足以监测 1cm 内的位移。

近年来,有学者开始尝试将网络 RTK 技术应用于地质灾害监测,文献^[38]基于模拟形变平台和某省 5 个连续运行参考站(Continuously Operating Reference Stations,CORS),探讨分析了使用 VRS 代替物理基准站进行滑坡位移监测的可行性,结果显示由于区域基准站网存在大气残留误差,VRS 的定位精度会略低于物理基准站,经实时滑动窗口平滑后的精度与物理基准站相当。文献^[39]利用 CORS 观测数据生成 VRS,对 30 处滑坡监测点进行实验分析,结果显示 CORS 站间距小于 40km 时,双差对流层和电离层延迟模型内插精度优于 10mm,利用时长大于 8h 的数据可实现平面精度优于 5mm,高程精度优于 10mm 的形变监测。网络 RTK 可有效改善常规 RTK 误差随基线距离增加而增大的问题,同时可以降低目前滑坡监测“一点一基站(一个灾害点和一个基准站)”常

规模带来的经济成本。但目前还存在 CORS 的建设密度与质量在不同区域有所不同、大气误差改正模型与地形地貌相关等问题^[34]。

4) PPP。不同于上述 3 种监测方法,PPP 是一种单站绝对定位方法,其利用精密轨道、精密钟差产品,精确考虑并改正观测值中的各项误差,以获取高精度的绝对三维坐标。PPP 技术应用于地质灾害变形监测已有不少案例,文献^[40]基于滑坡物理模型实验,证明了 PPP 技术应用于滑坡监测的可行性。文献^[41]利用 PPP 技术处理青海玛多 7.4 级地震震区附近 9 个 GNSS 高频观测数据及远场 12 站的 GNSS 低频观测数据,获取了高精度同震形变场,并指出现有 CORS 网具备快速确定区域大震(7 级以上)震源机制和震级的能力。文献^[42]利用福建省某滑坡监测点数据进行 PPP 计算实验,验证了多系统组合 PPP 在滑坡监测中的定位性能和可靠性,结果表明多系统组合 PPP 达到 cm 级精度大约需要 30min,定位结果收敛后外符合精度优于 5cm。文献^[43]选用四川西山村 8 个监测站的 GNSS 观测数据进行实验及分析,探讨了 PPP 技术在复杂环境下滑坡变形监测的应用能力,结果显示平均 5.93h 的观测时长基本可以使 PPP 达到 1~2cm 的监测精度,可以用于变形较为缓慢的滑坡体变形监测。

观测环境对 PPP 技术影响较大,且在定位时存在一个初始化过程,实现 cm 级 PPP 高精度定位的收敛时间长,数据中断后还需要再次实施初始化,目前还无法满足某些滑坡灾害高精度实时监测的需求。目前滑坡变形监测广泛使用的相对定位技术,其高精度、可靠的监测结果依赖于稳定的基准站,但在实际应用中可能很难找到符合监测规范的基准站布设位置,或受外界影响(地震、人类工程活动等)而出现基准站位置发生变化的情况。因此,可以使用 PPP 技术对基准站的稳定性进行定期检测,以确保相对定位监测结果的可靠性^[44]。此外,PPP 技术也可以作为不宜架设基准站的滑坡监测场景下的一种备用方案。

图 1 描述了目前各类 GNSS 技术在滑坡灾害监测中的表现能力。从图 1 可以看出,静态相对定位监测精度最高,但实时监测性能最差,一般用于对缓慢变形滑坡灾害体的定期监测分析;RTK 技术监测精度次于静态相对定位,但其是滑坡灾害 GNSS 监测技术中适用范围最广的技术,对缓慢和快速变形的灾害体均可进行实时监测;网络 RTK 技术监测精度略次于短距离 RTK,但其实时监测和适用性与 RTK 为同

一水平,且凭借覆盖范围广的优势,能够对多个滑坡灾害区域进行监测;PPP 技术受制于观测环境和收敛时间的影响,目前在滑坡灾害监测中精度、实时性能及适用范围均不及 RTK 和网络 RTK 技术,更多是用于基准站的稳定性检测。

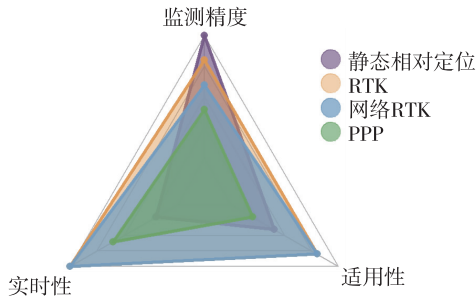


图 1 几种高精度 GNSS 监测技术的优缺点

Fig. 1 Advantages and disadvantages of several high-precision GNSS monitoring technologies

1.3 GNSS 监测结果时序处理研究进展

GNSS 技术用于滑坡灾害形变监测时,会受到各种误差源的污染,影响监测结果的稳定性和可靠性,如短基线相对定位模式下,监测时序主要受到多路径效应、粗差及测量噪声的影响^[45];中长基线模式下又会引入大气误差等^[46]。且在实时变形监测模式中,由于监测环境、成本限制等原因,监测时序中的各类噪声会更加显著。

1)多路径效应。多路径作为 GNSS 变形监测的主要误差源,无法利用差分的方法消除或削弱,但当测站与周围环境不变时,其与测站环境具有相关性。目前,消除或削弱多路径的方法主要有 3 种:第一种也是最优的选择,即选择一个良好的观测环境,但在地质灾害领域,测站常常不得不布设在多路径较强的环境;第二种方法是基于硬件设备削弱多路径^[47],但

成本较高,难以大范围推广应用;第三种也是目前广泛研究和采用的数据后处理算法,可分为多路径检测法和多路径缓解法两大类。在多路径检测法中,信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)或载噪比(Carrier-to-Noise Ratio, CNR)^[28,48-49]常被作为阈值指标,识别受多径影响较大的观测值并进行剔除;另外一种阈值方法是将多路径直接视为低频误差,在频域内进行高通滤波以削弱多径的影响^[50-51],但此方法需提前确定监测体的多径误差频率范围,否则可能会导致真实形变信号被错误去除。此外,机器学习算法也在近几年开始用于多路径的检测^[52],但如何削弱检测到的多径误差还需进一步研究^[53]。多路径缓解法包括基于观测值域^[54-55]或坐标域^[45,56]的恒星日滤波(Sidereal Filtering, SF)和基于空间域的多径半球图(Multipath Hemispherical Map, MHM)^[57-58]等,都是利用卫星轨道的时空重复性和测站环境相关性这 2 个特点,对多路径误差进行建模缓解。SF 的关键是确定卫星轨道的最佳重复周期和上一个重复周期的多路径改正模型,而基于空间域的 MHM 则无需考虑卫星轨道的重复周期,只与卫星的位置有关。文献^[59]比较了 GPS PPP 模式下的观测值域和坐标域的 SF,结果表明观测值域的 SF 结果更加稳定。文献^[58]将 SF 方法与改进的 MHM 方法进行了对比,表明 MHM 方法的改正效果略优于 SF。由于中长基线模式下同时存在多径和大气误差的影响,且大气误差无法通过滤波等方法消除,使得前后两重复周期的多径相关性不再显著,传统 SF 方法难以应用到中长基线 RTK/网络 RTK 中。文献^[55]通过对天顶对流层延迟建模,再从非差残差中减去对流层延迟影响,进而得到具有相关性的多径模型,该方法在远程基线高精度变形监测中具有良好的应用前景。表 1 比较了不同多路径削弱方法在滑坡灾害监测中的适用性。

表 1 不同多路径削弱方法在滑坡灾害监测中的适用性

Tab. 1 Applicability of different multipath weakening methods in landslide hazard monitoring

方法	优势	适用性
良好的观测环境		灾害监测环境难以满足要求
基于硬件设备	简单易操作,可从源头缓解多径	成本昂贵,难以大范围普及
SNR/CNR	适用于高低频数据,准确率较高	相对定位模式下多径缓解的合理性研究不成熟
高通滤波	实现简单,计算量小	不适用于滑坡灾害监测
机器学习	机器学习模型成熟后无需先验信息	算法尚未成熟,实时性难以保证
数据后处理算法	观测值域 SF 建模精准(可单独对某颗卫星进行多径建模)	多系统时效果下降
坐标域 SF	实现相对简单,计算量小	低频数据效果下降,多系统时效果下降
空间域 MHM	无需考虑卫星轨道的重复周期	模型精度与计算量成正比

2)粗差探测与时序滤波。复杂灾害监测环境下,GNSS容易受到对流层不稳定、信号中断以及强电磁场等因素干扰^[60],监测时序不可避免地会出现波动范围较大的粗差。这些粗差会导致无法准确反映监测体的真实形变信号,影响其稳定性分析和预测预警工作^[2]。目前,GNSS监测时序的粗差探测常用的方法主要有 3σ 和四分位距(Interquartile Range, IQR)两种,这两种方法都是基于观测数据的误差分布特征,采用假设检验对粗差进行探测^[61]。但由于监测时序存在位置移动,使得 3σ 和IQR的准确性都依赖于观测数据的残差序列准确性,一旦残差序列出现误差,将会导致粗差探测效果不佳^[60]。文献[62]分析了不同类型的粗差特征在小波变换后不同尺度上的表现规律,为选择合适的小波函数提供了一定的参考。文献[63]提出了一种结合小波分析和 3σ 的粗差探测方法,有效改善了 3σ 法因残差受污染带来的影响。文献[64]提出了联合奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)和未确知滤波(Unascertained Filtering, UF)的粗差探测方法,首先利用SSA提取形变信号,再利用UF确定粗差点的位置,其探测结果可靠性较高。文献[65]提出了一种基于状态域一致性理论的监测时序缓慢增长的粗差检测方法,可有效识别时序中缓慢增长的粗差。

GNSS监测时序中除多路径误差和粗差外,还存在大量的随机噪声。这些噪声会掩盖监测体的真实微小形变,时序滤波模型可有效削弱其影响,提升GNSS监测精度。文献[66]系统总结了几种经典的时序平滑及滤波技术。文献[67]提出了一种基于样本崩溃点的自适应滑动窗口方法,可自适应地处理GNSS变形监测时序,提供可靠的形变信息。文献[68]提出了一种基于动态权重的移动平均方法,使得当数据存在异常波动时也可获取接近于真实的平均值。文献[69]评估了三种滤波方法(简单移动平均、高斯加权移动平均和Savitzky-Golay)在GNSS高频变形监测时序滤波中的性能,结果表明简单移动平均结果与真实形变存在差异性,高斯加权移动平均和Savitzky-Golay则都能保留真实趋势特征。

2 滑坡灾害GNSS监测技术面临的关键问题

2.1 弱信号低成本监测型GNSS接收机研制

由于灾害体变形的空间差异性,往往需要在灾害体表面布设多台GNSS监测设备,通过一定密度的点状变形监测数据反映灾害体形变的整体趋势。

而且在复杂环境下,GNSS监测存在信号跟踪能力差和抗干扰能力弱等问题,因此,如何在控制成本的情况下同时获得较高质量的观测数据成为了亟需解决的问题。研究表明,采用相干积分和非相干积分结合的方式可以消除数据码长度对相干积分增益的影响^[70],利用差分相干积分减小非相干积分中的平方衰耗,可以提高信号捕获的灵敏度。为了提高信号捕获速度和精度,利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)进行伪码与载波频率捕获,采用延迟锁定环(Delay Locked Loop, DLL)与锁相环(Phase Locked Loop, PLL)实现GPS微弱信号的跟踪^[71]。传统的延迟锁定环跟踪方法的跟踪精度不高,并且在环境恶劣信号微弱的情况下容易导致锁定信号跟踪的失锁,最终导致无法定位。采用卡尔曼滤波器代替传统跟踪环路中的环路滤波器实现对弱信号的跟踪,使接收机能够成功地处理低信噪比的信号,从而实现码相位和载波相位的锁定^[72]。在成本控制方面,有学者采用物联网“传感器+云”的思维模式^[26,73],仅保留GNSS接收机中的数据采集和通信模块,虽然可以显著降低监测成本,但相较于专业型监测设备,GNSS低成本接收终端观测数据质量明显较差^[33,74],如何将弱信号处理技术与低成本GNSS接收机结合,为解决GNSS灾害监测精度、稳定性以及可靠性问题带来了挑战。

2.2 遮挡环境下GNSS载波模糊度可靠固定

我国地理环境复杂,多山区,在进行滑坡灾害GNSS监测时,卫星信号较差,接收机容易受到树木等的遮挡,整周模糊度解算面临很多挑战。首先,信号精度过差的卫星测量值会降低模糊度固定的准确率,并增加模糊度收敛时间,在模糊度解算过程中,可能会导致模糊度无法收敛^[75],没有收敛的模糊度会影响其他模糊度的固定,从而影响结果精度。其次,GNSS实时动态定位监测需要基准站和流动站有足够的共视卫星才能解算出可靠的模糊度,从而获得高精度的位置信息。但是在遮挡环境下的可视卫星分布不均匀,共视卫星少,空间结构差,导致定位解算时观测方程的强相关性,即存在病态性^[76],难以获得可靠的模糊度固定,从而严重影响GNSS监测结果。然后,在易出现信号失锁的情况下,需要重新进行模糊度固定,从而延长了GNSS监测时间序列收敛时间。最后,在山谷、密林等多遮挡环境下,GNSS载波相位观测值经常存在周跳,从而影响后面的GNSS载波相位观测值。在

进行模糊度固定前,必须进行周跳探测和修复,周跳的探测与修复对于后续模糊度的解算及最终定位结果的精确度至关重要^[77],否则极易影响模糊度固定率和模糊度固定速度,从而影响 GNSS 监测结果。因此,在复杂环境下进行滑坡灾害 GNSS 监测,模糊度的可靠固定是取得高精度结果的关键。

2.3 长基线大高差环境下 GNSS 大气误差处理与消除

在 GNSS 实时动态定位中,主要误差源来自大气延迟。大气延迟包括电离层延迟和对流层延迟,对流层又分为干延迟和湿延迟。在短基线 RTK 中,通过双差组合可以消除电离层延迟和对流层延迟。而长基线大高差下的 RTK,电离层延迟差和对流层延迟差会变大,从而影响最终的定位精度。其中电离层可以通过无电离层组合消除一阶项,电离层延迟受高差变化影响较小,即使两测站高差 10km,差异仅为 2.5cm^[78]。对流层的干延迟可以通过模型进行消除,而湿延迟由水汽引起,易受地形地貌和天气的影响。大气密度空间分布的不均匀性和时间差异性很强,特别是对于水汽,其分布不均匀,在水平面和垂直面上有所不同^[79],很难对其分布进行建模。对流层延迟大小与海拔高度密不可分,因而其主要影响垂直分量的精度,且易受高差影响。当两测站的高差较大时,即使基线长度较短,模型改正和双差也不能完全消除对流层延迟的影响。简单地通过基线的长度判断是否进行对流层延迟估计是不够严密的^[80]。而且当 2 个测站的高度差仅为 100m 时,2 个测站的对流层倾斜延迟差能达到 10cm 以上。当高程相差 1km 时,两点的对流层延迟之差也将达到分米级,严重影响定位结果。因此,在我国地形地貌复杂、多山地区,对于长基线大高差环境下的 RTK 监测取得良好的结果,对流层误差消除是关键。

3 滑坡灾害 GNSS 监测技术应用展望

3.1 高危滑坡环境下无人机抛投式 GNSS 监测装备系统

对滑坡灾害进行 GNSS 形变监测,首先就需要在滑坡变形体上布设 GNSS 监测装置。目前,监测设备的安装主要是通过安装人员携带 GNSS 监测设备及通信、供电等模块,到达滑坡灾害区域后进行安装。当安装位置位于高山峡谷或坡体边缘等危险区时,亦或是滑坡已经发生,需要布设监测设

备避免发生二次滑坡造成人员伤亡等情况时,设备安装人员难以到达设备安装位置进行安装作业,也就无法实施 GNSS 监测工作。而通过无人机抛投的方式进行 GNSS 监测设备的远程部署^[12],为高危滑坡环境下 GNSS 监测工作开展给出了一个新的解题思路。无人机抛投式监测是通过无人机将 GNSS 监测设备运输到滑坡体上空,然后抛投释放监测设备,固定在事先确定好的监测点位上,以实现滑坡体后续变形的监测。相较于常规人工安装部署的方式,无人机抛投式部署具有作业范围更广、风险更低等优点。但同时无人机自身的搭载能力也要求 GNSS 监测设备的体积和质量应尽可能小,可在保留监测设备必要模块的基础上考虑野外设备三防要求,对设备材料进行综合选型以减小体积和质量。此外,GNSS 监测设备在抛投释放后应牢牢固定在滑坡体上,可充分考虑 GNSS 监测设备的质量、外形等特征,研制可满足土质、岩质等不同类型滑坡场景下抛投固定需求的固定装置。尽管目前无人机抛投式 GNSS 监测技术还处于起步阶段,但随着抛投无人机、GNSS 监测设备、不同滑坡场景下抛投固定装置及复杂遮挡环境下无人机可靠导航定位算法等研究的不断深入、迭代和优化,研发一套系统完整、成熟、稳定的无人机抛投式 GNSS 监测装备系统,有望革新滑坡灾害监测领域传统人工部署的作业模式,提升 GNSS 监测设备部署效率,推动 GNSS 在复杂滑坡灾害应急规模化监测应用,为我国防灾减灾提供重要技术支撑。

3.2 基于 GNSS 地基参考站网的大范围滑坡灾害监测

北斗地基参考站网在中国的建设已经如火如荼,国家及各省市建设基准站数量已超过 6000 座^[81]。该站网建设规格高,数据质量好,目前主要用于坐标框架维持、基础测绘及大型工程建设,亟需推广地基参考站网在滑坡灾害监测等其他领域的应用。传统的短距离 RTK 形变监测,因为其自身特性,存在监测范围受限的问题,而且当基准站发生形变或无可靠位置布设稳定基准站时,无法获得稳定可靠的变形监测序列。因此,有学者探讨了以卫星导航定位基准站作为地质灾害监测的基准^[82],采用网络 RTK 技术进行变形监测^[83]。网络 RTK 覆盖范围广,但该技术易受大气建模误差的影响,常用的 VRS 技术将大气建模值直接用于观测值生成,在大气较为活跃或参考站间距较大时监测精

度相对较低。与网络 RTK 技术不同,PPP-RTK 技术采用轨道、钟差、硬件延迟及区域参考站网提供的大气延迟产品,可满足监测终端的快速高精度定位需求,监测终端将大气建模产品作为外部约束使用,可有效避免 VRS 模式下对大气建模误差的敏感特性。但目前,PPP-RTK 技术在地质灾害应用中相对较少,其主要原因是该技术需额外依赖高精度高可靠的实时轨道、钟差及大气等增强产品,一旦增强产品发生延迟、中断或精度下降,其终端定位的性能会随之迅速降低^[84],监测结果用于滑坡灾害预警时存在虚警风险。但是,随着区域的或全球的地(星)基增强产品质量和性能的不提高,PPP-RTK 技术在滑坡灾害监测领域有着广阔的应用前景。

3.3 GNSS 多传感器位移融合预测

地表变形是灾害体发生破坏最直观的现象,对灾害体失稳初期的预警判据也主要是基于变形信息,因此,对滑坡地表位移进行预测一直是研究的热点之一^[85]。对于单个 GNSS 监测点而言,依据历史监测曲线对未来长期、短期一段时间的地表位移进行预测,可提供该监测点未来变形趋势的参考。但是,由于硬件、软件、预测方法和监测点周边环境等各种因素的影响,仍然存在着虚警、漏警与误警率高等问题。近年来,数据拟合、机器学习及神经网络等在 GNSS 位移预测中已有不少应用,预测精度也在逐渐提高^[86-88]。随着对滑坡形变机制研究的逐步深入,单纯利用历史位移监测信息进行预测缺少地质解释,研究热度有所减弱,而将 GNSS 位移与滑坡体的地质结构、变形机制及诱发因素等信息结合起来进行变形预测,有望进一步提高变形预测的精度和可靠性^[89]。另外,降雨是滑坡形变的重要影响因素,基于深度学习融合位移序列与降雨数据建立预测模型^[90-91],其预测结果可靠性、可解释性更强。不同滑坡的地质条件也不尽相同,如何确定出其形变的关键影响因子,并结合 GNSS 监测结果进行位移预测,是滑坡灾害 GNSS 智能预测的下一步研究方向。此外,对于单体滑坡而言,地表多个 GNSS 监测的累计位移、形变速率等结果趋势可能不同,除预测各监测点的变化趋势外,融合各监测点历史监测数据去预测该滑坡体的总体变化趋势也是滑坡灾害 GNSS 智能预测的重要内容^[92-93]。目前,雨量计、土壤湿度计、倾角仪和裂缝计等传感器在滑坡灾害监测中已有不少应用,不仅大大丰富了滑坡 GNSS 位移预测中的数据源,且融合多种类、多点位传感器

数据建立位移预测模型,可更可靠、合理地对滑坡体未来一段时间内的变化趋势作出预测,从而为滑坡灾害预警工作提供重要参考数据。

3.4 普适化 GNSS 滑坡监测云平台构建

30 多年来,GNSS 技术在滑坡形变监测中已经得到了广泛应用,但是由于 GNSS 定位的理论和技术的专业性较强,在实际应用中,主要依靠专业技术人员才能较好地完成滑坡变形监测的数据采集、数据传输、数据处理和分析预测等工作,非专业人员仍然难以直接应用 GNSS 技术进行滑坡变形监测。随着 GNSS 接收机软硬件制造技术的不断进步,目前 GNSS 监测技术的自动化、智能化水平已经得到大幅度提升,非专业人员已经能够独立安装 GNSS 监测设备,但对于 GNSS 接收机采集的观测数据还需要经过专业人员的处理和分析后才能投入实际应用。随着云计算和大数据时代的来临,使得 GNSS 监测数据可实时上传至云端进行计算,大量基于云平台的监测系统也应运而生^[10,94-95]。“云存储-云检验-云增强-云处理”的智能化数据处理模式,可为 GNSS 监测技术的推广应用提供有力支撑^[10],也为 GNSS 监测技术的普适化提供了契机。基于这些新技术,可以开发出界面友好、稳定、安全及拓展性强的云端 GNSS 监测智能预警系统,人们既能实时了解 GNSS 监测设备的运行状况,也可依据各滑坡体、各监测点的变形状态智能推送预警信息及现场智能声光报警;同时,基于共享云端监测数据库,可开发出移动端的滑坡监测预警平台,实现滑坡监测和预警信息流、数据流的高效发布,使得非专业人员也能够轻松自如地应用 GNSS 监测结果进行滑坡灾害的防范和预警,这必将有力地推动滑坡灾害群测群防和精准防控等工作的深入开展。

4 结语

经过 30 余年的发展,滑坡灾害 GNSS 监测技术已经取得了长足进步,目前已成为滑坡灾害地表三维形变信息获取的主要手段之一。但由于我国疆域辽阔、地形复杂以及气候多样,每年滑坡灾害仍频发,严重阻碍着国家重大战略工程的顺利实施,威胁着人民生命财产安全^[96-97],因此,人们对 GNSS 监测技术也提出了更高的要求。本文梳理了 GNSS 监测设备、高精度监测技术及监测结果时序处理在滑坡变形监测中的发展历程,分析了现阶段滑坡灾害 GNSS 监测存在监测设备的弱信号处理

能力不足、遮挡环境下模糊度可靠固定难及长基线大高差 GNSS 大气误差处理不佳等关键问题。最后,随着 GNSS 监测硬件的不断发展及 GNSS 监测技术研究的日益深入,对 GNSS 监测技术应用于滑坡灾害监测的未来发展趋势进行了展望,希望通过研发无人机抛投式 GNSS 监测装备,突破高危滑坡环境监测设备部署难的问题;通过借助现有 GNSS 地基参考站网实现大范围的滑坡灾害监测;通过对 GNSS 多传感器监测结果融合预测方法的研究,解决滑坡灾害监测预警中存在的虚警及误警率高的问题;通过加强对 GNSS 监测数据的智能化处理,降低 GNSS 滑坡监测的专业性,推动 GNSS 监测技术的普适化应用。

参考文献

- [1] 国务院关于加强地质灾害防治工作的决定[N]. 中国国土资源报, 2011-06-21(002).
Decision of the state council on strengthening the prevention and control of geological disasters [N]. China Natural Resources News, 2011-06-21(002)(in Chinese).
- [2] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374.
Xu Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360-374(in Chinese).
- [3] 赵永红, 王航, 张琼, 等. 滑坡位移监测方法综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2606-2612.
Zhao Yonghong, Wang Hang, Zhang Qiong, et al. Overview of landslide displacement monitoring methods [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2606-2612 (in Chinese).
- [4] 韩子夜, 薛星桥. 地质灾害监测技术现状与发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 138-141.
Han Ziye, Xue Xingqiao. Status and development trend of monitoring technology for geological hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 138-141(in Chinese).
- [5] 刘璞宇, 邹喜华, 李阳, 等. 光载一机多天线远程 GNSS 差分监测系统[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 197-204.
Liu Puyu, Zou Xihua, Li Yang, et al. Multi-antenna remote differential monitoring system based on a single GNSS-over-fiber architecture [J]. Journal of Radars, 2019, 8(2): 197-204(in Chinese).
- [6] Odolinski R, Teunissen P J G. Single-frequency, dual-GNSS versus dual-frequency, single-GNSS: a low-cost and high-grade receivers GPS-BDS RTK analysis[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(11): 1255-1278.
- [7] Hamza V, Stopar B, Sterle O. Testing the performance of multi-frequency low-cost GNSS receivers and antennas[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2029.
- [8] Hamza V, Stopar B, Ambrozic T, et al. Testing multi-frequency low-cost GNSS receivers for geodetic monitoring purposes[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4375.
- [9] 朱武, 张勤, 朱建军, 等. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1341-1350.
Zhu Wu, Zhang Qin, Zhu Jianjun, et al. Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1341-1350(in Chinese).
- [10] 白正伟, 张勤, 黄观文, 等. “轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(11): 1424-1429.
Bai Zhengwei, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Real-time BeiDou landslide monitoring technology of “light terminal plus industry cloud”[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(11): 1424-1429(in Chinese).
- [11] Tu R, Liu J, Lu C, et al. Cooperating the BDS, GPS, GLONASS and strong-motion observations for real-time deformation monitoring [J]. Geophysical Journal International, 2017, 209(3): 1408-1417.
- [12] 张勤, 白正伟, 黄观文, 等. 一种远程部署的地质灾害监测装置及其监测方法: CN202011192252.0[P]. 2021-12-07.
Zhang Qin, Bai Zhengwei, Huang Guanwen, et al. A remotely deployed geohazard monitoring device and its monitoring method: CN202011192252.0 [P]. 2021-12-07(in Chinese).
- [13] Weiss P. Welcome to the global navigation multi-constellation[J]. Engineering, 2021, 7(4): 421-423.
- [14] 刘宇平. GPS 静态相对定位方法及在地壳形变研究中的应用[J]. 地学前缘, 1998(1): 163.
Liu Yuping. GPS static relative positioning methods and their application in crustal deformation studies [J]. Earth Science Frontiers, 1998(1): 163(in Chinese).
- [15] Gili J A, Corominas J, Rius J. Using global positioning system techniques in landslide monitoring[J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 167-192.
- [16] Brunner F K, Hartinger H, Richter B. Continuous

- monitoring of landslides using GPS: a progress report [J]. *Geophysical Aspects of Mass Movements*, edited by: Bauer S J and Weber F, Austrian Academy of Sciences, Vienna, 2000: 51-60.
- [17] Abidin H Z, Andreas H, Djaja R, et al. Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(1): 23-32.
- [18] Squarzoni C, Delacourt C, Allemand P. Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps)[J]. *Engineering Geology*, 2005, 79(3-4): 215-229.
- [19] 陆业海, 吴定洪. GPS空间测量新技术在岩崩滑坡中的应用[J]. *大坝观测与土工测试*, 1995, 19(6): 33-36.
- Lu Yehai, Wu Dinghong. Application of GPS space survey technology in rockfall landslide[J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 1995, 19(6): 33-36(in Chinese).
- [20] 李劲峰. GPS应用于监测岩崩滑坡[J]. *长江流域资源与环境*, 1996, 5(3): 93-97.
- Li Jinfeng. Application of GPS in the monitoring rockfalls and landslides[J]. *Resources and Environment in the Yangtza Valley*, 1996, 5(3): 93-97(in Chinese).
- [21] 王利, 张勤, 范丽红, 等. 北斗/GPS融合静态相对定位用于高精度地面沉降监测的试验与结果分析[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(1): 119-125.
- Wang Li, Zhang Qin, Fan Lihong, et al. Experiment and results of high precision land subsidence monitoring using fused BDS/GPS data and static relative positioning[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(1): 119-125(in Chinese).
- [22] 亓星, 朱星, 修德皓, 等. 智能变频位移计在突发性黄土滑坡中的应用——以甘肃黑方台黄土滑坡为例[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(5): 190-195.
- Qi Xing, Zhu Xing, Xiu Dehao, et al. Application of intelligent variable frequency displacement meter to sudden loess landslide—a case of Heifangtai loess landslide[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(5): 190-195(in Chinese).
- [23] Eyo E E, Musa T A, Omar K M, et al. Application of low-cost GPS tools and techniques for landslide monitoring: a review[J]. *Jurnal Teknologi*, 2014, 71(4): 3828.
- [24] 王利, 张勤, 李寻昌, 等. GPS RTK技术用于滑坡动态实时变形监测的研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(2): 193-198.
- Wang Li, Zhang Qin, Li Xunchang, et al. Dynamic and real time deformation monitoring of landslide with GPS-RTK technology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(2): 193-198(in Chinese).
- [25] 赵晋帅. GPS RTK技术在滑坡动态实时变形监测中的应用[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(6): 72-74.
- Zhao Jinshuai. Application of GPS RTK technology to real-time deformation monitoring of landslide[J]. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition)*, 2018, 34(6): 72-74(in Chinese).
- [26] 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1300-1307.
- Zhang Qin, Huang Guanwen, Yang Chengsheng, et al. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1300-1307(in Chinese).
- [27] Han J, Huang G, Zhang Q, et al. A new Azimuth-Dependent Elevation Weight (ADEW) model for real-time deformation monitoring in complex environment by multi-GNSS[J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2473.
- [28] 刘健, 黄观文, 杜源, 等. 基于基准站信噪比先验信息的GNSS观测数据多路径误差识别方法及应用[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(2): 352-362.
- Liu Jian, Huang Guanwen, Du Yuan, et al. Method and application of identifying multipath errors in GNSS observation data based on prior information of base station's signal-to-noise ratio [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(2): 352-362(in Chinese).
- [29] 左旭彤, 王莫为, 崔勇. 低时延网络: 架构, 关键场景与研究展望[J]. *通信学报*, 2019, 40(8): 22-35.
- Zuo Xutong, Wang Mowei, Cui Yong. Low-latency networking: architecture, key scenarios and research prospect[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(8): 22-35(in Chinese).
- [30] Gao Y, Liu Z, Liu Z Z. Internet-based real-time kinematic positioning[J]. *GPS Solutions*, 2002, 5(3): 61-69.
- [31] Zhang L, Lv H, Wang D, et al. Asynchronous RTK precise DGNSS positioning method for deriving a low-latency high-rate output [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(7): 641-653.
- [32] 杜源. 高连续性GNSS实时滑坡监测算法与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- Du Yuan. Research on algorithm and application of

- high-continuity GNSS real-time landslide monitoring [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021(in Chinese).
- [33] 张勤, 白正伟, 黄观文, 等. GNSS 滑坡监测预警技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 1985-2000.
Zhang Qin, Bai Zhengwei, Huang Guanwen, et al. Review of GNSS landslide monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 1985-2000(in Chinese).
- [34] Zhao W Y, Zhang M Z, Ma J, et al. Application of CORS in landslide monitoring[C]// Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 861(4): 042049.
- [35] 舒宝, 何元浩, 王利, 等. 一种适用于大尺度卫星导航定位基准站的网络 RTK 方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1609-1619.
Shu Bao, He Yuanhao, Wang Li, et al. A network RTK method for large-scale satellite navigation and positioning reference stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1609-1619(in Chinese).
- [36] 高星伟, 陈锐志, 赵春梅. 网络 RTK 算法研究与实验[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11): 1350-1353.
Gao Xingwei, Chen Ruizhi, Zhao Chunmei. A network RTK algorithm and its test[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1350-1353(in Chinese).
- [37] Gümüş K, Selbesoğlu M O. Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system [J]. Measurement, 2019, 142: 131-137.
- [38] Wang P, Liu H, Nie G, et al. Performance evaluation of a real-time high-precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology[J]. Measurement, 2022, 199: 111457.
- [39] 王晨辉, 郭伟, 孟庆佳, 等. 基于虚拟参考站的 GNSS 滑坡变形监测方法及性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 990-996.
Wang Chenhui, Guo Wei, Meng Qingjia, et al. Landslide deformation monitoring method and performance analysis based on GNSS virtual reference station [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6): 990-996(in Chinese).
- [40] 王利, 张勤, 黄观文, 等. GPS PPP 技术用于滑坡监测的试验与结果分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2118-2124.
Wang Li, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Experiment results and analysis of landslide monitoring by using GPS PPP technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 2118-2124(in Chinese).
- [41] 李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS 观测的 2021 年青海玛多地震(Mw 7.4)同震形变及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1489-1497.
Li Zhicai, Ding Kaihua, Zhang Peng, et al. Coseismic deformation and slip distribution of 2021 Mw 7.4 Madoi earthquake from GNSS observation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1489-1497(in Chinese).
- [42] Lin C, Wu G, Feng X, et al. Application of multi-system combination precise point positioning in landslide monitoring[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8378.
- [43] 彭凤友, 聂桂根, 薛长虎, 等. GPS/BDS 精密单点定位技术在滑坡变形监测中的应用研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(6): 103-112.
Peng Fengyou, Nie Guigen, Xue Changhu, et al. Application of GPS/BDS precise point positioning technology in landslide deformation monitoring[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(6): 103-112(in Chinese).
- [44] 贾逸君, 成芳, 沈鹏礼. 四川宜宾 6.0 级地震对北斗地基增强基准站稳定性的短期影响[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1473-1478.
Jia Yijun, Cheng Fang, Shen Pengli. Short-term influence of M6.0 earthquake in Yibin, Sichuan, on the stability of base stations for BeiDou ground-based augmentation system[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1473-1478(in Chinese).
- [45] Dai W, Huang D, Cai C. Multipath mitigation via component analysis methods for GPS dynamic deformation monitoring[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3): 417-428.
- [46] Chen D, Ye S, Xu C, et al. Undifferenced zenith tropospheric modeling and its application in fast ambiguity recovery for long-range network RTK reference stations[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 1-13.
- [47] Jia Q, Wu R, Wang W, et al. Adaptive blind anti-jamming algorithm using acquisition information to reduce the carrier phase bias[J]. GPS Solutions, 2018, 22(4): 1-12.
- [48] Kubo N, Kobayashi K, Furukawa R. GNSS multipath detection using continuous time-series C/N₀ [J]. Sensors, 2020, 20(14): 4059.
- [49] Su M, Yang Y, Qiao L, et al. Multipath extraction and mitigation for static relative positioning based on adaptive layer wavelet packets, bootstrapped searches and CNR constraints[J]. GPS Solutions, 2021, 25

- (3): 1-12.
- [50] Moschas F, Stiros S. Noise characteristics of high-frequency, short-duration GPS records from analysis of identical, collocated instruments [J]. *Measurement*, 2013, 46(4): 1488-1506.
- [51] Xiong C, Lu H, Zhu J. Operational modal analysis of bridge structures with data from GNSS/accelerometer measurements[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 436.
- [52] Hsu L T. GNSS multipath detection using a machine learning approach[C]// *Proceedings of 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2017: 1-6.
- [53] Quan Y, Lau L, Roberts G W, et al. Convolutional neural network based multipath detection method for static and kinematic GPS high precision positioning [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2052.
- [54] Ye S, Chen D, Liu Y, et al. Carrier phase multipath mitigation for BeiDou navigation satellite system[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 545-557.
- [55] Chen D, Ye S, Xia F, et al. A multipath mitigation method in long-range RTK for deformation monitoring [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 1-12.
- [56] Shen N, Chen L, Wang L, et al. Site-specific real-time GPS multipath mitigation based on coordinate time series window matching [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 1-14.
- [57] Zheng K, Zhang X, Li P, et al. Multipath extraction and mitigation for high-rate multi-GNSS precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10): 2037-2051.
- [58] 王亚伟, 邹璇, 唐卫明, 等. 削弱 GNSS 多路径效应的半球格网点建模方法[J]. *测绘学报*, 2020, 49(4): 461-468.
Wang Yawei, Zou Xuan, Tang Weiming, et al. A method for mitigating GNSS multipath effect based on multi-point hemispherical grid model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 461-468(in Chinese).
- [59] Atkins C, Ziebart M. Effectiveness of observation-domain sidereal filtering for GPS precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(1): 111-122.
- [60] 王坚, 高井祥, 苗李莉. 强污染单历元 GPS 形变信号的提取和粗差识别[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, 29(5): 416-419.
Wang Jian, Gao Jingxiang, Miao Lili. Strong contaminated single epoch GPS deformation signals extracting and gross error detection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(5): 416-419(in Chinese).
- [61] 张恒璟, 程鹏飞. 基于 GPS 高程时间序列粗差的抗差探测与插补研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(4): 71-75.
Zhang Hengjing, Cheng Pengfei. Study on robust detection and interpolation from gross errors of GPS height time series[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 71-75(in Chinese).
- [62] 李喜盼, 扈静, 李海刚. 基于小波分析的 GPS 动态变形数据粗差识别模型研究[J]. *测绘通报*, 2011(4): 7-9.
Li Xipan, Hu Jing, Li Haigang. Research on model of gross error identification for GPS dynamic deformation data based on wavelet analysis[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(4): 7-9(in Chinese).
- [63] 吴浩, 卢楠, 邹进贵, 等. GNSS 变形监测时间序列的改进型 3σ 粗差探测方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(9): 1282-1288.
Wu Hao, Lu Nan, Zou Jingui, et al. An improved 3σ gross error detection method for GNSS deformation monitoring time series [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1282-1288 (in Chinese).
- [64] 张东华, 李志娟, 刘全明, 等. 奇异谱分析的变形监测序列粗差探测方法[J]. *测绘科学*, 2020, 45(8): 14-18.
Zhang Donghua, Li Zhijuan, Liu Quanming, et al. The gross error detection of dam deformation observation data based on singular spectrum analysis[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(8): 14-18(in Chinese).
- [65] Sun A, Zhang Q, Yu Z, et al. A novel slow-growing gross error detection method for GNSS/accelerometer integrated deformation monitoring based on state domain consistency theory[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4758.
- [66] Einicke G. Smoothing, filtering and prediction: estimating the past, present and future[M]. BOD-Books on Demand, 2012.
- [67] Huang G, Wang D, Du Y, et al. Deformation feature extraction for GNSS landslide monitoring series based on robust adaptive sliding-window algorithm [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022: 487.
- [68] Banerjee P, Bansal S. Revisit of moving average technique for smoothing GNSS based timing data[J]. *Mapan*, 2017, 32(1): 77-85.
- [69] Sharifi S, Hendry M T, Macciotta R, et al. Evaluation of filtering methods for use on high-frequency measurements of landslide displacements[J]. *Natural*

- Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22(2): 411-430.
- [70] 雷蕾. GPS 信号捕获、跟踪算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
Lei Lei. GPS signal capture and tracking algorithm research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010(in Chinese).
- [71] 上官伟, 王晶晶, 蔡伯根, 等. GPS 微弱信号捕获跟踪算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 108-113+126.
Shangguan Wei, Wang Jingjing, Cai Bogen, et al. Acquisition and track algorithm of GPS weak signal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 108-113+126(in Chinese).
- [72] 曾晓飞. GPS 软件接收机微弱信号捕获跟踪算法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
Zeng Xiaofei. Study on the algorithm for weak signal acquisition and tracking in GPS software receiver[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010(in Chinese).
- [73] 黄观文, 黄观武, 杜源, 等. 一种基于北斗云的低成本滑坡变形实时监测系统[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1008-1016.
Huang Guanwen, Huang Guanwu, Du Yuan, et al. A low-cost real-time monitoring system for landslide deformation with BeiDou cloud[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 1008-1016(in Chinese).
- [74] 陈孜, 黄观文, 白正伟, 等. 基于低成本毫米级 GNSS 技术的膨胀土边坡现场监测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 214-224.
Chen Zi, Huang Guanwen, Bai Zhengwei, et al. Field monitoring of expansive soil slope based on low-cost millimeter-sized GNSS technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 214-224(in Chinese).
- [75] Li J, Yang Y, Xu J, et al. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual-and triple-frequency observations[J]. GPS Solutions, 2015, 19(1): 5-13.
- [76] Li B, Shen Y, Feng Y. Fast GNSS ambiguity resolution as an ill-posed problem[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(11): 683-698.
- [77] Banville S, Langley R B. Mitigating the impact of ionospheric cycle slips in GNSS observations[J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(2): 179-193.
- [78] Song J, Park B, Kee C. Comparative analysis of height-related multiple correction interpolation methods with constraints for network RTK in mountainous areas[J]. Journal of Navigation, 2016, 69(5): 991-1010.
- [79] Wielgosz P, Cellmer S, Rzepecka Z, et al. Troposphere modeling for precise GPS rapid static positioning in mountainous areas[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(4): 045101.
- [80] 章迪, 郭际明, 陈雪丰, 等. 对流层延迟估计对高差较大短基线解算的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(2): 146-149.
Zhang Di, Guo Jiming, Chen Xuefeng, et al. Influence of estimation of tropospheric delay on short baseline with big height difference[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(2): 146-149(in Chinese).
- [81] 姜卫平. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1379-1388.
Jiang Weiping. Challenges and opportunities of GNSS reference station network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1379-1388(in Chinese).
- [82] 高艳龙, 郑智江, 韩月萍, 等. GNSS 连续站在天津地面沉降监测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(5): 22-26.
Gao Yanlong, Zheng Zhijiang, Han Yueping, et al. Application of CORS of GNSS in land subsidence monitoring in Tianjin[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(5): 22-26(in Chinese).
- [83] Drummond P. Combining CORS networks, automated observations and processing, for network RTK integrity analysis and deformation monitoring[C]// Proceedings of 15th FIG Congress Facing the Challenges. Sydney, Australia, 2010: 11-16.
- [84] 舒宝, 王利, 张勤, 等. SSR 延迟下的轨道钟差外推误差及其对多 GNSS 实时精密单点定位的影响评估[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1738-1750.
Shu Bao, Wang Li, Zhang Qin, et al. Evaluation of multi-GNSS orbit and clock extrapolating error and their influence on real-time PPP during outages of SSR correction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(12): 1738-1750(in Chinese).
- [85] Wu S, Hu X, Zheng W, et al. Threshold definition for monitoring gap landslide under large variations in reservoir level using GNSS[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24): 4977.
- [86] 姜宇航, 王伟, 邹丽芳, 等. 基于粒子群-变分模态分解、非线性自回归神经网络与门控循环单元的滑坡位移动态预测模型研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 601-612.
Jiang Yuhang, Wang Wei, Zou Lifang, et al. Research

- on dynamic prediction model of landslide displacement based on particle swarm optimization-variational mode decomposition, nonlinear autoregressive neural network with exogenous inputs and gated recurrent unit[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S1): 601-612 (in Chinese).
- [87] 杨背背, 殷坤龙, 杜娟. 基于时间序列与长短时记忆网络的滑坡位移动态预测模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2334-2343.
Yang Beibei, Yin Kunlong, Du Juan. A model for predicting landslide displacement based on time series and long and short term memory neural network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2334-2343(in Chinese).
- [88] 孟蒙, 陈智强, 黄达, 等. 基于 H-P 滤波法、ARIMA 和 VAR 模型的库区滑坡位移综合预测[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2): 552-560.
Meng Meng, Chen Zhiqiang, Huang Da, et al. Displacement prediction of landslide in three gorges reservoir area based on HP filter, ARIMA and VAR models[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 552-560(in Chinese).
- [89] 黄润秋, 许强. 地质灾害系统演化特性的定量判定[J]. *中国科学基金*, 2000, 14(5): 265-269.
Huang Runqiu, Xu Qiang. Quantitative analysis about evolutive characteristics of geological hazard system[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2000, 14(5): 265-269(in Chinese).
- [90] 尚敏, 张惠强, 廖芬, 等. 考虑降雨滞后效应的八字门滑坡位移预测研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(3): 242-250.
Shang Min, Zhang Huiqiang, Liao Fen, et al. Displacement prediction of Bazimen landslide considering rainfall lag effect[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 242-250(in Chinese).
- [91] 王利, 许豪, 舒宝, 等. 利用互信息和 IPSO-LSTM 进行滑坡监测多源数据融合[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10): 1478-1488.
Wang Li, Xu Hao, Shu Bao, et al. A multi-source heterogeneous data fusion method for landslide monitoring with mutual information and IPSO-LSTM neural network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1478-1488(in Chinese).
- [92] 郭科, 彭继兵, 许强. 应用多传感器目标跟踪融合技术实现滑坡多点监测数据综合信息的提取[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 808-813.
Guo Ke, Peng Jibing, Xu Qiang. Realization of the extraction of comprehensive information of multi-station monitoring data of landslide with the technique of multi sensor target tracking[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 808-813(in Chinese).
- [93] Zhang Y, Wang L, Shu B, et al. Application of an adaptive weighted estimation fusion algorithm in landslide deformation monitoring data processing[C]// *Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020, 570(6): 062045.
- [94] 王毅鹏, 张永志, 赵超英, 等. 云计算技术下的滑坡监测云平台设计——以陕西泾阳为例[J]. *测绘通报*, 2019(3): 128-132+136.
Wang Yipeng, Zhang Yongzhi, Zhao Chaoying, et al. Design of landslide monitoring cloud platform based on cloud computing technology: taking Jingyang as an example[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(3): 128-132+136(in Chinese).
- [95] 陶志刚, 张海江, 彭岩岩, 等. 滑坡监测多源系统云服务平台架构及工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(7): 1649-1658.
Tao Zhigang, Zhang Haijiang, Peng Yanyan, et al. Frame structure and engineering applications of multi-source system cloud service platform for landslide monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1649-1658(in Chinese).
- [96] 殷跃平. 新世纪工程地质学系列丛书《滑坡监测预警与应急防治技术研究》出版[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(4): 92.
Yin Yueping. Engineering geology series in the new century "Research on Landslide Monitoring, Early Warning and Emergency Prevention Technology" was published[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(4): 92(in Chinese).
- [97] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2377-2389.
Peng Jianbing, Cui Peng, Zhuang Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377-2389(in Chinese).

(编辑:孟彬)