

引文格式: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. DOI:10.11947/j. AGCS.2019.20190167.
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. DOI: 10. 11947/j. AGCS. 2019.20190167.

“轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术

白正伟,张 勤,黄观文,景 策,王家兴

长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054

Real-time BeiDou landslide monitoring technology of “light terminal plus industry cloud”

BAI Zhengwei,ZHANG Qin,HUANG Guanwen,JING Ce,WANG Jiaying

College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Implementing the high-precision, real-time and three-dimensional deformation monitoring for the landslide area, which is the prerequisite for the accurate warning of landslide disasters. GNSS technology is currently the only way to directly obtain the three-dimensional vector deformation of landslide disaster surface, but GNSS has two problems of high-cost and low-reliability in large-scale landslide monitoring. The ideas of Internet of Things and the concept of “cloud platform plus monitoring terminal” are proposed in this article. Thus, we develop a real-time BeiDou/GNSS monitoring equipment with thousands RMB cost. The millimeter monitoring and warning cloud platform also are developed independently. This equipment successfully applied to real-time monitoring and early warning of Heifangtai landslide in Gansu Province. Cooperated with early warning system of the Chengdu University of Technology, we issued an accurate warning signal 40 minutes in advance to avoid casualties and property losses. The remote video surveillance installed on the landslide body recorded the whole process of landslide disaster for the first time.

Key words: landslide; GNSS; BeiDou; low cost; high-precision; monitoring and early warning

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41731066; 41774025); The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC1505102); The Outstanding Youth Foundation of Shaanxi (No. 2019JC-20); The Grand Projects of the BeiDou-2 System (No. GFZX0301040308); The Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges (Nos. CHD300102268305; CHD300102268305)

摘 要:对滑坡区域进行地表高精度实时三维变形监测,是实现滑坡灾害精准预警的前提。GNSS 技术是目前唯一直接获取滑坡灾害实时地表三维矢量变形的手段,但 GNSS 应用于大范围滑坡监测存在成本高和计算能力差两大问题。本文采用物联网思维,以“云+端”的设计理念,自主研发了千元级小型化实时北斗/GNSS 监测技术装备,并研制了毫米级实时监测预警云平台,成果成功应用于甘肃黑方台滑坡实时监测预警。联合成都理工大学预警系统提前 40 min 发出了准确预警信号,避免了人员伤亡和财产损失。安装在滑坡体上的远程视频监控首次近距离记录了滑坡灾害发生的全过程。

关键词:滑坡;GNSS;北斗;低成本;高精度;监测预警

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2019)11-1424-06

基金项目:国家自然科学基金(41731066; 41774025);国家重点研发计划(2018YFC1505102);陕西省杰出青年基金(2019JC-20);二代导航重大专项(GFZX0301040308);中央高校科研业务费专项(CHD300102268305; CHD300102268305)

我国滑坡灾害分布范围广、数量多、发生次数频繁,每年滑坡灾害造成的生命财产损失超过百亿元^[1]。对滑坡区域地表进行高精度实时连续监测是实现滑坡精准预警和减灾防灾的重要前提^[2]。全球导航卫星系统(GNSS)是连续实时获取滑坡地表三维矢量变形的主要技术手段,其中北斗卫星导航系统优势明显,其具有亚太区域卫星数目多、可视卫星高度角大等特点,成为复杂区域滑坡高精度监测的首选系统^[3-7]。目前专业型 GNSS 监测设备成本昂贵(数万元/台),而已知和潜在的危險滑坡数以千万计,且影响范围超过国土面积的三分之二,高成本问题使得无法进行专业 GNSS 监测设备的大范围布设^[8]。常规接收机端解算的处理方式计算能力有限,而复杂观测环境下要想实现高精度变形监测,必须建立环境模型,进行去噪与误差改正,这就需要较高的处理能力,因此常规模式难以实现高精度监测,也就难以实现复杂危險区域滑坡灾害的精准预警。

本研究团队自 2015 年开始,依托国家基金委重点基金和科技部重点研发等项目,针对 GNSS 滑坡监测设备成本高、监测精度低、实时性差等问题,提出采用物联网“传感器+云”的思维模式,研发高精度小型化千元级 GNSS 滑坡监测传感器设备。以“轻终端+行业云”的设计理念,在大幅度降低接收机成本的同时,利用行业云平台增强技术和精细模型改正,实现了对滑坡地表的毫米级 GNSS 实时监测,为滑坡灾害精准预警提供了有力支撑^[9]。

1 “轻终端+行业云”滑坡监测技术装备

1.1 千元级数据采集终端设计

目前高精度 GNSS 定位模块或定位板卡销售价格从数百元(如 UBLOX 模块)、千元级(国产板卡)至数千元(国产板卡和国外板卡)不等,通过叠加数据处理单元、存储单元、电池单元、通信单元以及其他行业功能单元后,研制销售的单台高精度 GNSS 接收机价格则上升至数万元(国产接收机)至十余万元(国外接收机)。除了价格高昂外,目前高精度 GNSS 监测接收机的行业特征明显,专业门槛较高,无论是外业安装还是硬件调试均需要专业人员进行操作,无形中還大幅增加了人力成本。

本研究团队为实现低成本大范围的实时滑坡高精度三维形变监测,采用物联网“传感器+云”的思维,通过剥离 GNSS 监测终端中的非必要功能模块,如导航定位、数据存储、电池等功能模块,仅保留数据采集模块和通讯模块,成功研发出了小型化的千元级 GNSS 接收机。利用 2G/3G/4G 等通信手段将监测数据实时传送至云端,在云平台上实现云存储和云计算。这种“轻终端+行业云”的设计理念,将终端成本降至最低,同时设备安装和调试均可以通过云端软件实现监控和设置,大幅降低了现场安装人员的专业要求,一定程度上将行业终端设备变革成了大众消费型普适设备^[10]。传统行业终端与低成本终端设计思路对比如图 1 所示。

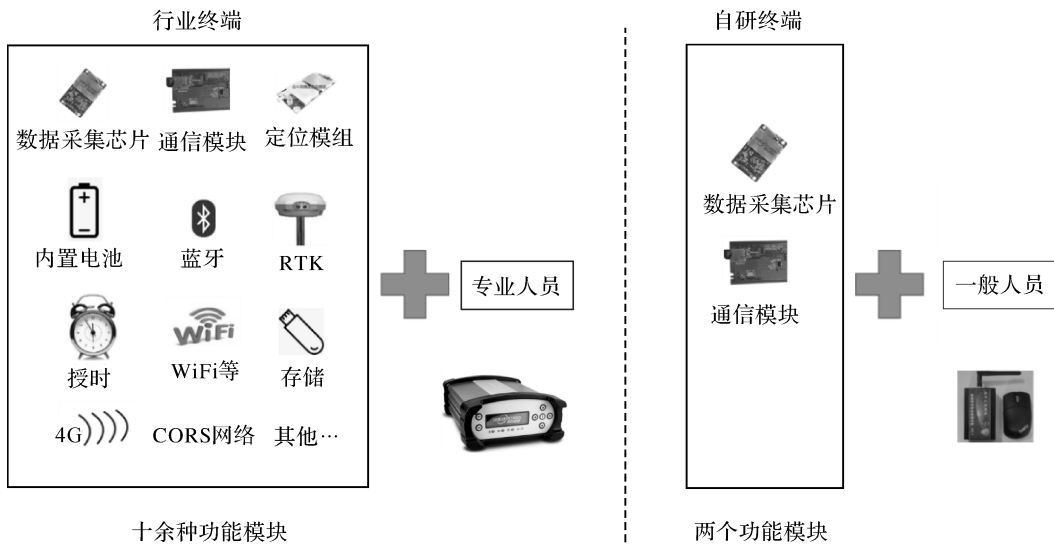


图 1 传统行业终端与低成本终端设计思路对比

Fig.1 Comparison of traditional receiver module and low-cost receiver module

1.2 毫米级实时监测预警云平台技术

高精度 GNSS 实时定位算法是获取高可靠三维形变监测结果的重要前提。目前传统 GNSS 滑坡监测数据处理主要有两种方式。第 1 种方式采用 1 h 甚至更长时段的静态差分解,进行准实时监测,这种定位模式监测精度较高,一般三维精度优于 1 cm。但该定位模式实时性差,对突发性滑坡或滑坡临滑阶段,难以及时监测,更无法实现实时预警^[1]。第 2 种方式采用实时单站 RTK 动态定位模式进行监测。这种模式虽然顾及了时效性,但由于仅为两站之间进行动态实时差分解算,其定位精度较差,一般三维精度仅为厘米级,同时接收机端的处理能力有限,监测精度容易受到复杂环境噪声等影响,监测结果不可靠。此外,上述两种处理模式对基准站的稳定性和数据可靠性依赖性大,一般基准站出现不稳定,将直接影响监测结果的可靠性和精度。

针对上述传统 GNSS 滑坡监测数据处理的局限性,研究团队在小型化低成本硬件终端研制的基础上,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。主要思路如下:

(1) 云平台实时接收不同区域监测点的观测数

据流和广播电文数据流,在云平台上进行云存储,同时生成单小时弧段、多小时弧段以及天弧段文件等。

(2) 结合云平台生成的超快速星历产品等,利用实时数据质量检核单元对所有测站数据进行实时云检核,筛选出高可靠的 GNSS 观测数据和星历数据。

(3) 基于监测点高度角、方位角等信息,进行测区环境建模补偿^[11-13];受遮挡卫星观测值预测^[14];基于周围 GNSS 观测站及测区内稳定的监测点,生成多个候补基准点增强数据。另外,计算生成监测站先验形变约束信息、先验基准站坐标约束信息、先验水汽约束信息等多个增强信息,构造云增强模型。

(4) 结合环境建模和增强信息,对每个监测点进行附加约束的实时 GNSS 动态定位解算,同时基于精密单点定位技术对基准站稳定性进行定位检核,并实时标定出基准站形变补偿值^[15]。云平台进行实时定位监测的同时,利用高精度准静态定位解算结果,每小时对每个监测点的历史形变数据进行自更新,提升滑坡监测序列的实时预报精度。最后实时对比滑坡变形预报值和预警先验阈值,进行滑坡灾害的实时预警^[16-18]。行业云平台的简要技术路线如图 2 所示。

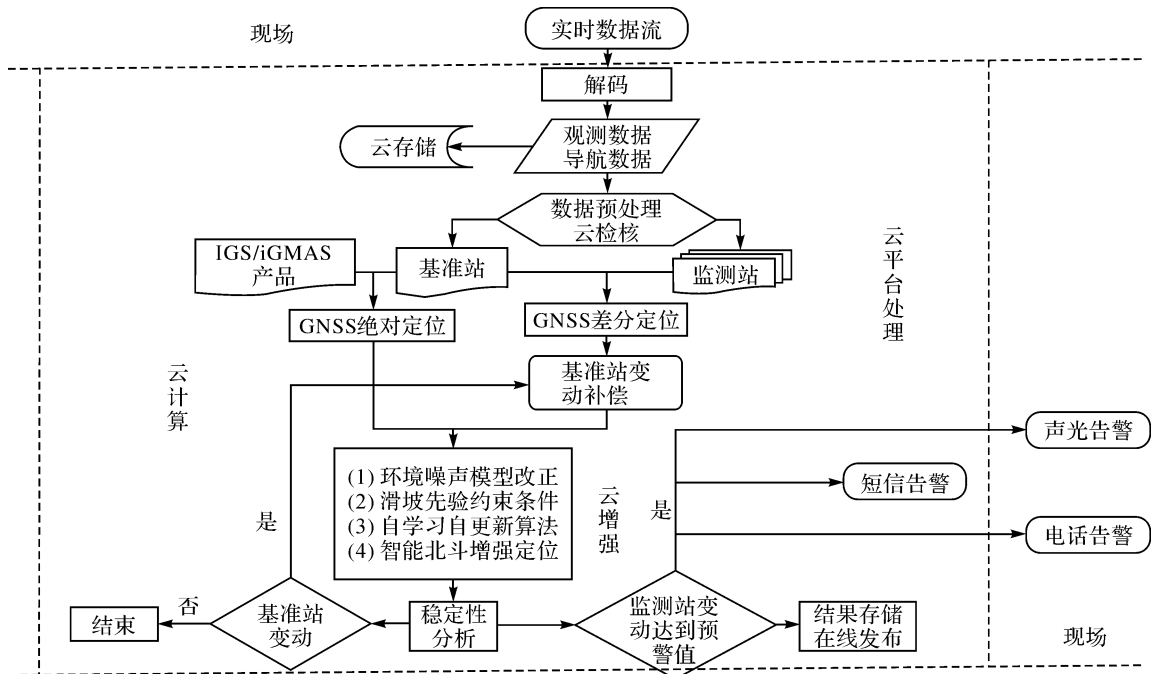


图 2 行业云平台的简要技术路线

Fig.2 Brief technical route for the professional cloud platform

2 甘肃黑方台滑坡监测实例分析

2.1 黑方台滑坡概况

黑方台位于甘肃省临夏州永靖县盐锅峡镇黄

河北岸,黄土台塬面积 13.7 km²。台上农田常年采用大水漫灌的方式浇地,每年平均灌溉量超过 5×10⁶ m³。受地形影响,地下水位聚集不散,台上部分区域地表下挖 1 m 即可出水,近年来黑方

台边缘频繁发生滑坡,危害严重^[19-21]。本文监测区域为黑方台党川滑坡,台塬顶部和底部的平均高差大于 70 m,滑坡主体距离下方主要居民区水平距离约 400 m,坡体正下方为水渠和农田。研究团队在坡上布设了低成本 GNSS 监测设备 13 套,具体监测点和居民区分布如图 3 所示。



图 3 GNSS 监测点和居民区分布

Fig.3 Distribution of GNSS monitoring points and residential areas

2.2 GNSS 监测结果分析

对于滑坡灾害的精准预警,需要实时获取 3 个监测指标,分别是监测点的累计位移、变形速率和切线角。本次滑坡监测时间段为 2018 年 10 月 25 日至 2019 年 3 月 26 日。图 4 给出了滑坡体 GNSS 监测点(HF08)各方向累计位移时间序列结果,图中滑坡预警级别各阶段判据见表 1^[22],图 5 给出了 HF08 点各方向变形速率时间序列结果。

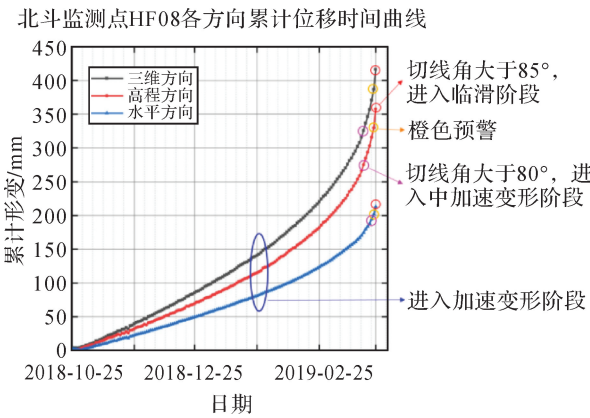


图 4 黑方台滑坡 HF08 点各方向累计位移时间序列结果
Fig.4 Cumulative displacement time series results of HF08 points in Heifangtai landslide

表 1 滑坡预警级别定量划分标准

Tab.1 Landslide warning level quantitative division standard

滑坡变形阶段	等速	初加速	中加速	临滑
预警级别	注意级	警示级	警戒级	警报级
警报形式	蓝色	黄色	橙色	红色
改进的切线角	$\alpha \approx 45^\circ$	$45^\circ < \alpha < 80^\circ$	$80^\circ \leq \alpha < 85^\circ$	$\alpha \geq 85^\circ$

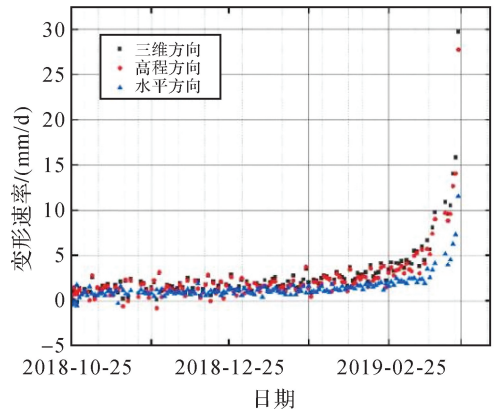


图 5 黑方台滑坡 HF08 点各方向变形速率时间序列结果
Fig.5 Time series results of deformation rate in all directions of HF08 point of Heifangtai landslide

为了采用改进切线角作为滑坡演变各阶段判据,需要将位移时间 $S-t$ 曲线变换为纵横坐标量纲一致的 $T-t$ 曲线。选取 2018 年 11 月 3 日至 2019 年 1 月 24 日为等速变形阶段,由此算得等速变形阶段三维方向平均变形速率为 1.57 mm/d,高程方向平均变形速率为 1.29 mm/d,水平方向平均变形速率为 0.92 mm/d。累计位移除以等速变形阶段各方向平均变形速率($T=S/V, V$ 为等速变形阶段平均变形速率),得到变换后的各方向 $T-t$ 曲线(图 6)。

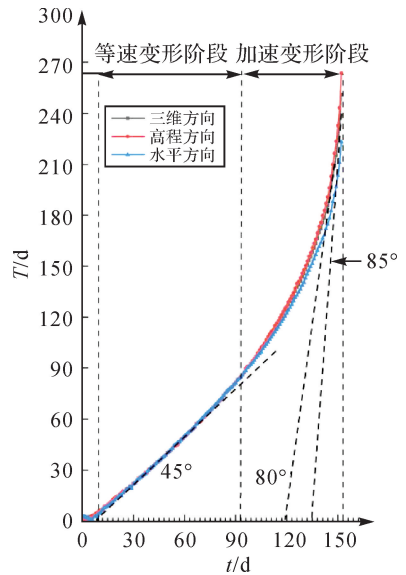


图 6 变换后的 $T-t$ 曲线图

Fig.6 Transformed $T-t$ graph

根据文献^[23-25]提出的改进切线角 α 作为滑坡预警判据,将滑坡变形预警阶段细分为等速变形阶段($\alpha \approx 45^\circ$),此阶段对应蓝色预警;初加速变形阶段($45^\circ < \alpha < 80^\circ$),此阶段对应黄色预警;中加速变形阶段($80^\circ \leq \alpha < 85^\circ$),此阶段对应橙色

预警;临滑阶段($\alpha \geq 85^\circ$),此阶段对应红色预警。3月23日GNSS水平方向、高程方向、三维方向切线角都超过 80° ,3月25日GNSS各方向切线角超过 85° 。北斗监测系统将GNSS观测点的累计位移、变形速率和改进切线角等信息发送至成都理工大学预警平台,成都理工大学预警平台于26日凌晨1时25分发出橙色预警信息(图7),4时34分发出红色预警信息。3月26日4时59分40秒,GNSS监测点HF08处滑坡开始滑动,安装在滑坡体上的视频监控清晰地拍下了滑坡发生的全过程(图8)(滑动视频见 <http://news.chd.edu.cn/2019/0326/c300a56335/page.htm>),本次滑坡台塬后退宽度约8m,滑坡区域长度约130m,滑坡总体积约20000m³,由于提前发出了预警信息,疏散了生产作业人员,本次滑坡未造成人员伤亡和财产损失。



图7 监测系统发的橙色预警信息

Fig.7 Orange warning information sent by the monitoring system



图8 监控视频所拍滑坡开裂过程

Fig.8 Monitor the landslide cracking process

3 总结

针对GNSS滑坡监测设备成本高、监测精度低和实时性差等问题,本文提出了“轻终端+行业云”的设计理念,研发了高精度小型化千元级GNSS滑坡监测传感器设备,利用行业云平台增强技术和精细模型改正,实现了对滑坡地表的高精度GNSS实

时监测。研究成果在甘肃黑方台滑坡监测中进行了工程应用,成功实现了3月26日4时59分党川滑坡灾害的准确预警。黑方台滑坡灾害的成功预警也初步验证了“轻终端+行业云”低成本实时滑坡监测技术成果的可行性,可为下一步大范围普适性GNSS滑坡监测技术推广提供支撑。

本文研究成果目前已经在陕西、甘肃、四川等多个省市的滑坡灾害、地面沉降等实时监测预警工程中得到应用。

参考文献:

- [1] 文海家,张永兴,柳源. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 1-4, 16. WEN Haijia, ZHANG Yongxing, LIU Yuan. A home and abroad investigative-tendency of landslide forecast[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 1-4, 16.
- [2] TOMÁS R, LI Zhenhong. Earth observations for geohazards: present and future challenges[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 194.
- [3] YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(5): 614-624.
- [4] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [J]. Journal of the Institute of Navigation, 2019, 66(1): 7-18.
- [5] 黄才,赵思浩. 国家定位导航授时基础设施现状及能力展望[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(5): 19-26. HUANG Cai, ZHAO Sihao. Present situation and outlook of national positioning, navigation and timing infrastructures [J]. Navigation Position & Timing, 2017, 4(5): 19-26.
- [6] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8. NING Jinsheng, YAO Yibin, ZHANG Xiaohong. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 3-8.
- [7] 王阅兵,甘卫军,陈为涛,等. 北斗导航系统精密单点定位在地壳运动监测中的应用分析[J]. 测绘学报, 2018, 47(1): 48-56. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170147. WANG Yuebing, GAN Weijun, CHEN Weitao, et al. The analysis of precise point positioning of BeiDou navigation satellite system application in crustal motion monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(1): 48-56. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170147.
- [8] TU R, WANG R, GE M, et al. Cost-effective monitoring of ground motion related to earthquakes, landslides, or volcanic activity by joint use of a single-frequency GPS and a MEMS accelerometer[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(15): 3825-3829.
- [9] 黄观文,黄观武,杜源,等. 一种基于北斗云的低成本滑坡实时监测系统[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1008-1016. HUANG Guanwen, HUANG Guanwu, DU Yuan, et al.

- A lowcost real-time monitoring system for landslide deformation with BeiDou cloud[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(4): 1008-1016.
- [10] 雷哲哲, 黄观文, 杜源, 等. 低成本 U-blox 模块的单频 GPS/BDS 增强 PPP 定位性能分析[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(1): 74-80.
- LEI Zhezhe, HUANG Guanwen, DU Yuan, et al. Single frequency GPS/BDS enhanced PPP positioning performance analysis of low cost U-blox module[J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2019, 6(1): 74-80.
- [11] 严丽, 黄丁发, 朱东伟. 一种高精度北斗基线解算软件的研制与性能分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(12): 1785-1791.
- YAN Li, HUANG Dingfa, ZHU Dongwei. Development and performance analysis of a high precision BDS baseline processing software [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1785-1791.
- [12] HAN Junqiang, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, 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.
- [13] 韩军强, 黄观文, 李哲. 复杂环境下 GNSS 滑坡监测多路径效应分析及处理方法[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(3): 355-362.
- HAN Junqiang, HUANG Guanwen, LI Zhe. Multipath effect analysis and processing method of GNSS landslide monitoring under complicated environment[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(3): 355-362.
- [14] DU Yuan, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, et al. A novel predictive algorithm for double difference observations of obstructed BeiDou geostationary earth orbit (GEO) satellites [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(5): 1554-1565.
- [15] 胡亚轩, 王雄, 程林, 等. GNSS 观测站环境变化对数据质量的影响[J]. *测绘科学*, 2018, 43(3): 131-136.
- HU Yaxuan, WANG Xiong, CHENG Lin, et al. Study on the data quality with the changing surroundings of GNSS stations[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(3): 131-136.
- [16] 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.
- [17] 贺小星. GPS 坐标序列噪声模型估计方法研究[J]. *测绘学报*, 2017, 46(3): 398. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160549.
- HE Xiaoxing. Study on the noise model of GPS coordinates time series[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 398. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160549.
- [18] 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170453.
- ZHANG Qin, HUANG Guanwen, YANG Chengsheng. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1300-1307. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170453.
- [19] 元星, 许强, 赵宽耀, 等. 甘肃黑方台灌溉与地下水位响应规律分析[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(9): 205-209.
- QI Xing, XU Qiang, ZHAO Kuanyao, et al. Analysis on law of response from irrigation to groundwater level at Heifangtai tableland in Gansu province[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(9): 205-209.
- [20] 张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术——以黄河三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例[J]. *地质通报*, 2013, 32(6): 833-839.
- ZHANG Maosheng. Formation mechanism as well as prevention and controlling techniques of loess geo-hazards in irrigated areas: a case study of Heifangtai immigration area in the Three Gorges reservoir of the yellow river[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6): 833-839.
- [21] 元星, 许强, 李斌, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡地表水入渗机制初步研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(3): 418-424.
- QI Xing, XU Qiang, LI Bin, et al. Preliminary study on mechanism of surface water infiltration at Heifangtai loess landslides in Gansu[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(3): 418-424.
- [22] 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.
- XU Qiang, TANG Minggao, HUANG Runqiu. Large-scale landslide monitoring and early warning and emergency response[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [23] 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. *地质通报*, 2009, 28(4): 501-505.
- XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 501-505.
- [24] 王珣, 李刚, 刘勇, 等. 基于滑坡等速变形速率的临滑预报判据研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(12): 3670-3679.
- WANG Xun, LI Gang, LIU Yong, et al. Critical sliding prediction criterion of landslide based on constant deformation rate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3670-3679.
- [25] 唐亚明, 薛强, 李政国, 等. 基于单体和区域尺度的黄土滑坡监测预警方法与实例[J]. *灾害学*, 2015, 30(4): 91-95, 106.
- TANG Yaming, XUE Qiang, LI Zhengguo, et al. Loess landslide monitoring and early-warning methods and practices on scale of single slope and regional scope[J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(4): 91-95, 106.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2019-05-05

修回日期: 2019-07-29

第一作者简介: 白正伟(1991—),男,博士生,研究方向为 GNSS 高精度定位技术理论与应用。

First author: BAI Zhengwei (1991—), male, PhD candidate, majors in theory and application of GNSS high precision positioning technology.

E-mail: bzbw0816@163.com

通信作者: 张勤

Corresponding author: ZHANG Qin

E-mail: zhangqinle@263.net.cn