

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.06

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探 ——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

侯圣山¹, 李昂¹, 陈亮¹, 冯振¹, 王立朝¹, 曹鹏², 刘军友², 郑浩², 李阳光², 黄鑫³, 郭伟³, 魏新平⁴
(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 航天科工惯性技术有限公司, 北京 100071; 4. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 在甘肃省滑坡灾害较为严重的兰州市和岷县, 选择了三处滑坡, 建设了基于普适型仪器的专群结合监测预警系统。按照《地质灾害专群结合监测预警技术指南(试行)》的要求, 选用裂缝计、GNSS、土体含水量仪、雨量计、声光报警器等, 对地质灾害体变形破坏、相关因素、宏观前兆等指标开展专业化立体综合监测。监测设备采用蓄电池加太阳能的方案来供电, 保证24小时不间断工作; 通讯系统采用现场LoRa组网配合2/3/4G移动通信的方案, 能够保证数据传输的效率, 同时降低通信成本; 监测数据同时发送到国家和省级地质灾害监测数据平台, 能够高效支撑地灾预警工作; 监测平台能够对实时采集的监测数据自动进行分析, 支持用多种预警模型进行判别; 监测数据发生变化触发预设条件时, 能够自动发送预警信息。通过近四个月的系统试运行, 捕捉到了滑坡mm级的蠕变变形, 数据可靠, 能够满足监测预警的需求。通过三处滑坡监测预警工程的实施, 一方面对滑坡变形和环境因素实现了实时监控, 同时也为类似问题提供了一个可供参考的解决方案。

关键词: 地质灾害; 滑坡; 监测; 预警; 普适型

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0047-07

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

HOU Shengshan¹, LI Ang¹, CHEN Liang¹, FENG Zhen¹, WANG Lichao¹, CAO Peng², LIU Junyou², ZHENG Hao², LI Yangguang², HUANG Xin³, GUO Wei³, WEI Xinping⁴

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Centre of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Aerospace Science & Industry Inertial Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China; 4. Gansu Institute of Geoenvironment Monitoring, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Geohazard is a serious problem in Lanzhou and Minxian County of Gansu Province, northwest China. Three landslides in Lanzhou and Minxian County were selected for universal monitoring construction.

收稿日期: 2020-07-24; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目: 基于地质云的地质灾害预警与快速评估示范研究(2018YFC1505500); 中国地质调查局地质调查项目: 洮河流域中游灾害地质调查(DD20190645); 国家自然科学基金重点项目: 青藏高原东缘古滑坡复活机理与早期识别研究(41731287)

第一作者: 侯圣山(1977-), 男, 山东梁山人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查监测相关研究。E-mail: houshengshan@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 陈亮(1983-), 男, 河北文安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质环境保护与地质灾害防治科研工作。E-mail: chenliang@mail.cgs.gov.cn

According to “Technical guide for geohazard monitoring and early warning based on the combination of professional and mass monitoring (trial use)”, crack-meter, GNSS monitoring, soil moisture monitoring, real-time rain-gauge and alarm apparatus were used in the landslide monitoring network. Power supply of landslide monitoring instruments is from Li-ion battery and solar panels, providing sufficient power to 24 h-per-day working. Data transmission of real-time data is based on LoRa and 2/3/4 G mobilecommunications, with increasing reliability and cost reduction. Monitoring data were transmitted to national platform and provincial platform simultaneously, providing real-time data for both platforms. The monitoring data were analyzed automatically, using multi-module for landslide prediction and warning. When abnormal data were discriminated, SMS messages were delivered automatically to designated personnels for further processing. Through fourmonths’ trial operation, the creep deformation of millimeter-level of landslide was captured. The data is reliable and meets the needs of monitoring and early warning. Through the implementation of three landslide universal monitoring projects, on the one hand, real-time monitoring of landslide deformation and environmental factors is realized, and a reference solution is provided for regions with similar problems.

Keywords: geo-hazard; landslide; monitoring; warning; universal monitoring measure

0 引言

地质灾害监测预警是降低地质灾害风险的一项重要工作^[1]。我国地质灾害监测预警工作始于 20 世纪 80 年代,先后在长江三峡库区、四川雅安、云南新平、陕西镇安等地建成涵盖区域环境要素监测和典型地质灾害单体监测的监测预警系统,应用了多种监测手段和监测设备,开发了数据库和信息系统,能够有效监控灾害变形和诱发因素的时间变化,做出了有益的尝试^[2]。

2014 年以来,中央和地方按照预防为主、综合防治的总体原则,将地质灾害防治工作重点从灾后治理转移到灾前预防,建立健全地质灾害调查评价、群测群防、监测预警、搬迁避让、工程治理、科普宣传及应急处置等在内的综合防治体系,在多个省份开展了监测预警建设,建设了数百处地质灾害监测系统,投入数千套仪器设备,取得了较好的监测预警效果,也取得了大量建设经验^[3]。

党的十八大以来,中央加大了自然灾害防治工作力度,提出了更高的要求。自然资源部陆昊部长提出了“研究原理、提前预警”的具体要求,中国地质调查局部署了普适型地质灾害监测预警设备的研发和现场试验工作^[4],编制了《地质灾害专群结合监测预警技术指南(试行)》。

按照《中国地质调查局地质灾害监测预警普适型仪器设备示范试用工作方案(2020 年 3 月)》,“洮河流域中游灾害地质调查”项目承担甘肃省三处地质灾害监测预警系统的建设工作。

1 选点

“洮河流域中游灾害地质调查”项目的工作区为岷县和兰州市,监测预警试点工作也在这一区域进行选点。选点遵照“危险性、代表性、可行性”的三原则,重点选择群测群防难度大、变形失稳较明显、成灾风险相对高的滑坡体。

1.1 工作区地质环境条件

岷县位于甘肃南部,属于西秦岭北支中段,紧邻长江流域和黄河流域的分界线,洮河穿流而过,为典型的中高山侵蚀地貌,县域平均海拔 2 500 m,是甘肃省滑坡、泥石流活跃区之一^[5]。岷县气候类型主要为高寒湿润气候带,多年平均降水量为 560.8 mm,6—8 月降水占总降水量的 60% 以上,受地形及海拔高度影响,降雨的时空分布差异较大,呈现出由河谷到山顶,降雨量随海拔高度升高逐渐增大的趋势。

兰州市位于黄河岸边,主要分布于黄河的各级阶地之上。兰州市气候类型为大陆性季风气候,多年平均降水量为 317.2 mm,降雨多集中在 7—9 三个月,约占全年降水量的 60% 以上。兰州市降水量虽较小,但其降雨强度大,历时短、暴雨多,4 小时最大降雨量 150 mm,另有 1 小时平均降雨量 50 mm 的记录,有利于滑坡、泥石流等地质灾害的形成^[6]。

1.2 普适型监测预警建设选点

岷县的主要地质灾害类型为泥石流、滑坡,但泥石流多流域面积巨大,且具有洪水的性质;致灾特征受水文过程控制多于岩土过程。考虑到典型性、代表性,在岷县选择了两处中等规模的滑坡——马场村滑坡和文

斗学校滑坡开展监测预警系统建设工作(图 1)。

兰州市南北两山山前及冲沟地带分布多处滑坡。本次在兰州市选择了稳定性较差的一处黄土滑坡——石峡口滑坡开展监测预警系统建设(图 1)。



图 1 地质灾害普适型监测点分布图

Fig. 1 Distribution of landslides being momonitored

1.2.1 马场村滑坡

马场村滑坡位于岷县梅川镇马场村马场沟沟口左岸低山山前第一斜坡带。该滑坡处于构造剥蚀中低山地貌区,地势陡峻,植被稀少,以耕地为主的人类活动强烈,经人类耕作活动的改造坡面形态呈台阶状。滑坡前方为马场沟冲洪积堆积区,地势平坦,其上主要为居住和基础设施为主,马场村和国道 212 线就分布在

此区域。

经初步踏勘,该滑坡平面形态呈不规则簸箕状,滑坡体长约 120 m,宽 180 m,厚 5 m,滑坡面积 $1.98 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积 $10.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,规模为中型。滑坡主滑方向为 291° ,滑体后壁坡度 42° 左右,滑体坡面平均坡度为 28° ,滑体前缘坡脚局部因人为削坡建房而形成高 8 m,坡度约 65° 的人工边坡。目前,该滑坡约中下部可见弧形裂缝(2015 年出现),垂直下错距离 10 ~ 45 cm,延伸长度约 30 m,基本贯通。滑体前缘村民新建房屋墙体挤压变形开裂。

马场村滑坡为一处具有古滑坡局部复活特征的土质滑坡,监测主要针对滑坡变形、土体含水量及降雨量开展,布设 4 台 GNSS、2 套裂缝计、1 台雨量计和 1 套含水量监测仪(3 个探头,埋深分别为 0.5 m、1.0 m 和 1.5 m)。这一方案的实施,将实时监测滑坡区裂缝变形、绝对位移、土体含水量变化和降雨情况,从而对滑坡的变形及诱发因素进行监控。

1.2.2 文斗学校滑坡

该斜坡位于岷县梅川镇文斗九年制学校北山第一斜坡带前缘。地貌单元属构造剥蚀中低山区,地层岩性上部为坡积、残积碎石土,下部为二叠系下统十里墩组(P_1sl)石英砂岩、粉砂岩、板岩。

经现场初步踏勘,该滑坡为残坡积堆积层老滑坡,滑坡体长 120 m,宽 100 m,主滑方向 175° ,平均坡度 25° ,体积约 $18.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,属中型滑坡。目前,滑坡前缘发育一处坡宽为 60 m,坡长 45 m,坡度 65° 的不稳定斜坡。2019 年 7 月,该斜坡中部出现一条裂缝,延伸长度 25 m,缝宽 5 ~ 30 cm。目前,该斜坡仍处于不稳定状态,严重影响坡脚文斗中学操场和教学楼,威胁人口约 500 人,危险性大。

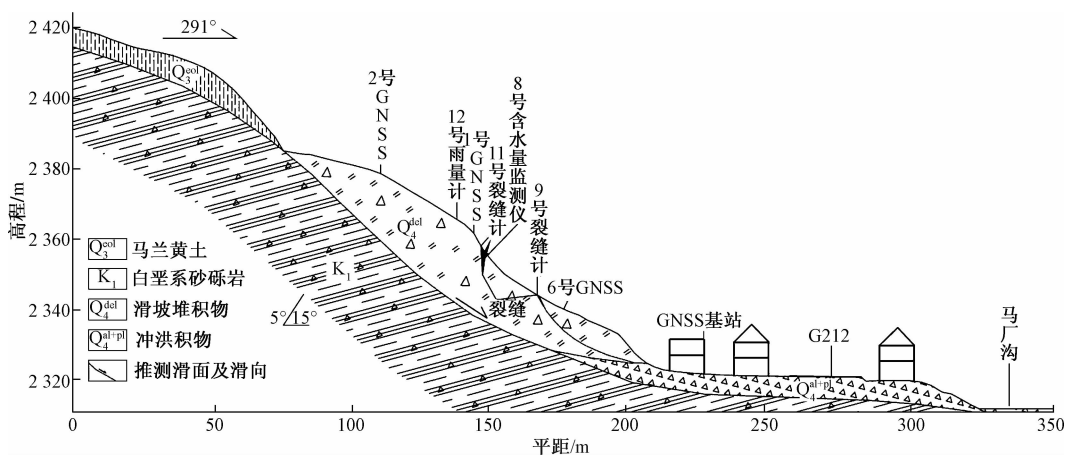


图 2 马场村滑坡监测剖面图

Fig. 2 Profile of monitoring network of Macangcun Landslide

针对文斗学校滑坡坡度大、威胁群众多的特点,布设 4 台 GNSS、2 套裂缝计、1 台雨量计和 1 套声光报警器。

1.2.3 石峡口滑坡

石峡口滑坡位于兰州市城关区武警总队加油站西侧,处于黄河 V 级高阶地。滑坡宽约 217 m, 高约 90 ~ 130 m, 坡向 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 整体坡度约 35° 。滑坡区坡顶地势平坦, 为市政林场和办公室, 坡脚为罗锅沟沟道、九州大道和新九州花园小区, 坡顶和斜坡坡面可见多处变形迹象, 稳定性差。石峡口滑坡长约 76 m, 宽约

55 m, 主滑方向 22° , 平均厚度约 5 m, 滑坡体积约 $2.09 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。威胁对象为坡顶市政林场工人、坡脚对岸的武警总队油库、九州大道过往车辆及行人, 威胁财产约 2 000 万元。

本次对石峡口滑坡变形区开展监测示范, 布设 4 台 GNSS、2 套裂缝计、1 台雨量计和 1 套含水量监测仪 (3 个探头, 埋深分别为 0.5 m、1.0 m 和 1.5 m), 实时监测滑坡区裂缝变形、绝对位移、土体含水量变化和降雨情况, 从而对滑坡的变形及诱发因素进行监控。

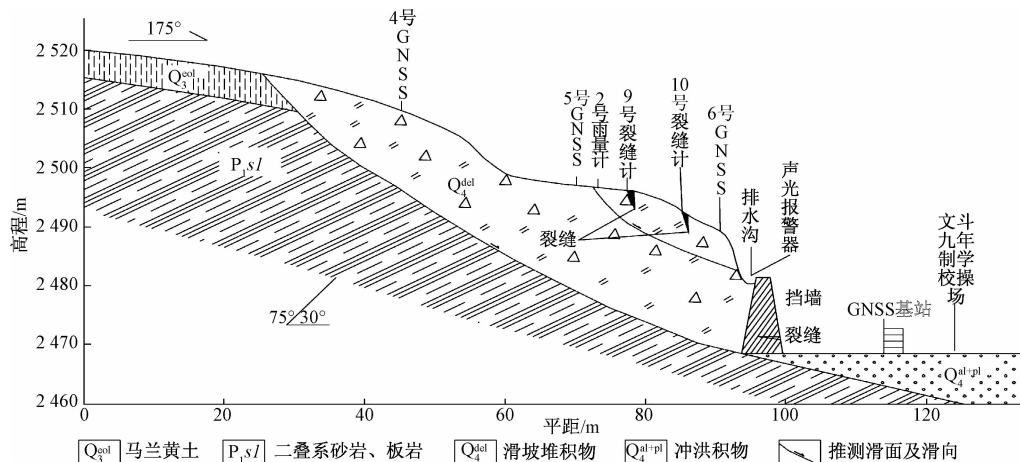


图 3 文斗学校滑坡监测剖面图

Fig. 3 Profile of monitoring network of Wendou School Landslide

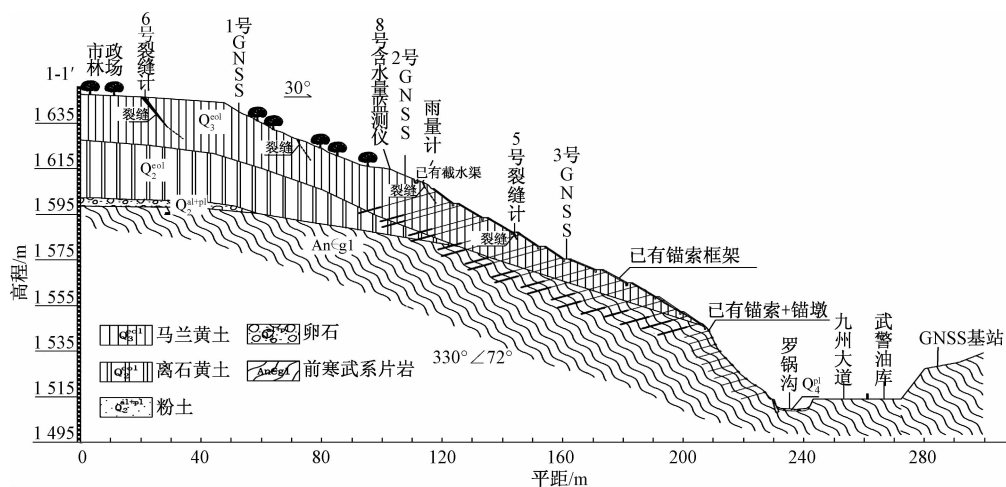


图 4 石峡口滑坡监测方案剖面图

Fig. 4 Profile of monitoring network of Shixiakou Landslide

2 监测系统建设

按照《地质灾害专群结合监测预警技术指南(试行)》的要求, 本次监测工作选用了 GNSS、雨量计、无线位移计、含水量监测仪等, 选用了航天科工惯性技术

有限公司生产的设备, 主要传感器的技术参数及技术特征如下:

普适型 GNSS 接收机: 1、全开放天空静态解算精度: 平面优于 $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, 高程优于 $\pm 10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$; 2、星频: BDS: B1/B2, GPS L1/L2, L2,

GLONASS G1/G2;3、工作温度: -40 ℃至80 ℃;4、工作湿度:最大98% RH;5、采用天线、主机一体化结构;6、防水防尘:IP67;7、供电:无日照能连续正常工作时间10天;8、通讯:内置全网通通信模块,支持移动、联通、电信2/3/4 G传输;9、支持通电自启。

普适型雨量计:1、最大瞬时雨量0.4 mm/s;2、分辨力:不低于0.5 mm;3、测量准确度:误差 $\leq \pm 5\%$;4、通讯:支持2/3/4 G全网通;5、供电系统:无日照连续正常工作时间不小于30天;6、工作温度: -20 ℃至65 ℃;7、工作湿度:最大98% RH;8、防水防尘:IP66;9、可与无线网关集成安装(表1)。

表1 三处滑坡监测设施表

Table 1 Monitoring network of 3 landslides

地质灾害名称	地理位置	仪器设备类型及数量	安装布设位置
马场村滑坡	岷县梅川镇马场村G212东侧	2套普适型裂缝计	裂缝变形处
		4台GNSS	1条剖面
		1处含水量监测(3个探头)	滑坡变形区
		1台雨量计	滑坡区房顶
文斗学校滑坡	岷县梅川镇文斗学校后山	2套普适型裂缝计	裂缝变形处
		4台GNSS	1条剖面
		1台雨量计	滑坡区房顶
		1套声光报警器	威胁对象处
兰州九州开发区石峡口滑坡	兰州市城关区武警总队加油站西侧	2套普适型裂缝计	裂缝变形处
		4台GNSS	1条剖面
		1处含水量监测(3个探头)	滑坡变形区
		1台雨量计	滑坡区

普适型无线位移计(2 m):1、量程:0~2 000 mm;2、分辨力:0.2 mm;3、测量精度: $\pm 0.1\%$ F·S;4、具备阈值触发功能,触发阈值1.5 mm,位移变化值超过阈值,则自动上报位移计数据;5、通讯:支持2/3/4 G全网通或短距无线方式;6、短距无线通信能力:空旷3 km/遮挡情况不低于500 m;7、待机功耗:3.7 V/60 μ A;8、供电系统:一体化集成5 V/1 W光伏充电,20 Ah可充电锂电池,无日照工作时间可达2年;9、支持休眠状态下随时唤醒;10、工作温度: -20 ℃至65 ℃;11、工作湿度:最高98% RH;12、防水防尘:IP66。

3 监测预警试运行

监测方案和仪器选型确定以后,即进入现场施工阶段。至2020年5月31日,完成了设备的安装调试,进入试运行阶段。

3.1 数据汇集

安装到地质灾害监测现场的每台GNSS设备将监测数据进行单独发送;雨量计、裂缝计和含水量监测仪

采用远距离无线传输技术(LoRa)的方式在现场进行数据汇集,通过布设在监测现场的网关集中进行数据传送。

监测数据同时发送到设置在中国地质环境监测院的地质云“地质灾害监测预警信息系统”平台和设置在甘肃省地质环境监测院的“甘肃省地质灾害信息一张图”系统平台。两处平台均有显示监测设备布置、图形化显示实时监测数据等功能。

在基于地质云的“地质灾害监测预警信息系统”平台上,可以设置单参数和多参数的预警指标和判据,自动判别实时监测数据,达到预设预警条件时,自动生成预警信息,并将预警信息以手机短信的形式发送到指定联系人。

3.2 监测数据情况

从2020年5月31日全部监测设备安装完毕,数据陆续在数据平台上线。监测系统运行情况良好,数据在线率一直是100%。

从图5可以看出,石峡口滑坡6号裂缝计(滑坡后缘)的监测数据和累积降雨量之间存在明显的相关性,6月15日前后、6月26日前后、7月2日前后、7月9日前后、7月17日前后、8月24日前后、8月28日前后、9月14日前后、9月22日前后等降雨过程均对应着裂缝数据的增大。用Excel里面的CORREL(array1, array2)函数计算,得到裂缝值和累积降雨量值之间的相关系数为0.9812,显示出强正相关的特征。6号裂缝增大和强降雨过程密切相关。

6月9日至9月25日,基本上涵盖了一个完整的汛期,石峡口滑坡所在地累积降雨363.1 mm,后缘裂缝增大15.2 mm,目前,通过现场调查并没有发现明显整体失稳的特征,但需要严密监控降雨情况和变形情况,及时分析滑坡稳定性状况。

从图6可以看出,文斗学校滑坡4号GNSS监测点监测到的水平位移也同降雨之间存在明显的相关性,6月15日前后、6月21日前后、6月26日前后、7月9日前后、7月8日前后、8月12日前后、8月24日前后等降雨过程均对应着4号GNSS水平位移的增大。用Excel里面的CORREL(array1, array2)函数计算,得到4号GNSS水平位移和累积降雨量值之间的相关系数为0.9437,显示出强正相关的特征。同样,可以用降雨预测滑坡整体的变形。6月9日至9月25日文斗学校滑坡所在地累积降雨747.0 mm,4号GNSS水平位移32.3 mm,目前,通过现场调查并没有

发现明显整体失稳的特征,但需要严密监控降雨情况和变形情况,随时分析判别滑坡稳定性状况。

除以上数据显示出明显的相关规律外,三处滑坡其它监测设施也采集到了连续的监测数据。

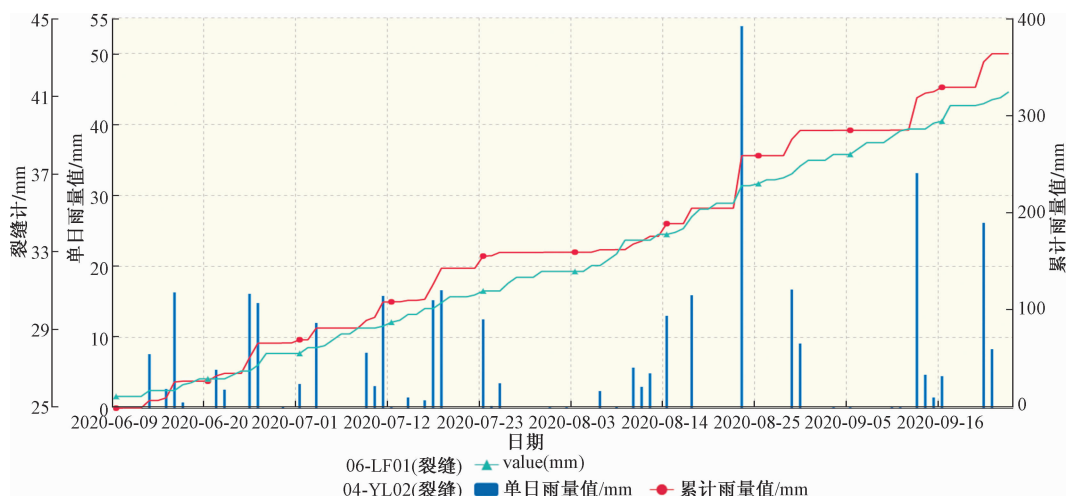


图5 2020年6月9日至9月25日石峡口滑坡6号裂缝计及日降雨量、累积降雨量数据图

Fig.5 No.6 crack-meter data and daily rainfall, accumulation rainfall data of Shixiakou Landslide during June 9 and September 25, 2020

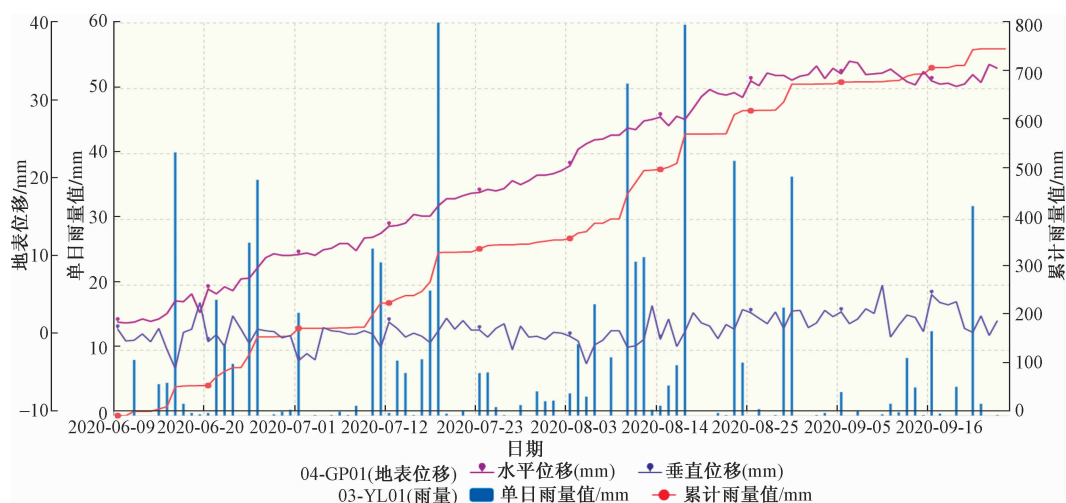


图6 2020年6月9日至9月25日文斗学校滑坡4号GNSS及日降雨量、累积降雨量数据图

Fig.6 No.4 GNSS data and daily rainfall, accumulation rainfall data of Wendou School Landslide during June 9 and September 25, 2020

3.3 预警系统试运行情况

设备安装调试完毕后,预警系统即开始上线试运行。

预警判据主要采用中型土质滑坡的判据,分为降雨判据和位移判据。降雨判据体系,利用10分钟降雨量($R_{1/6h}$)、1小时降雨量(R_{1h})、1天降雨量(R_{1d})、3天降雨量(R_{3d})等指标进行综合判断确定预警等级^[7],降雨指标根据地区经验来进行赋值,并在预警

运行过程中进行调整。位移判据体系,利用GNSS和裂缝监测数据,对滑坡稳定性进行判断^[8]。降雨和位移判据见表2。

通过近4个月的试运行,共触发了45次预警,其中红色预警9次、橙色预警8次、黄色预警9次、蓝色预警19次,由降雨判据触发的10次、裂缝及GNSS位移触发的35次。预警模型判据的研究工作尚需深入开展。

表 2 三处滑坡预警判据表

Table 2 Critical values for warning of three landslides

预警级别	蓝色	黄色	橙色	红色
降雨判据	$11 \leq R_{1/6\text{ h}} < 14\text{ mm}$	$14 \leq R_{1/6\text{ h}} < 17\text{ mm}$	$17 \leq R_{1/6\text{ h}} < 20\text{ mm}$	$R_{1/6\text{ h}} \geq 20\text{ mm}$
	或 $18 \leq R_{1\text{ h}} < 22\text{ mm}$	或 $22 \leq R_{1\text{ h}} < 26\text{ mm}$	或 $26 \leq R_{1\text{ h}} < 30\text{ mm}$	或 $R_{1\text{ h}} \geq 30\text{ mm}$
	或 $30 \leq R_{1\text{ d}} < 40\text{ mm}$	或 $40 \leq R_{1\text{ d}} < 50\text{ mm}$	或 $50 \leq R_{1\text{ d}} < 60\text{ mm}$	或 $R_{1\text{ d}} \geq 60\text{ mm}$
	或 $55 \leq R_{3\text{ d}} < 70\text{ mm}$	或 $70 \leq R_{3\text{ d}} < 85\text{ mm}$	或 $85 \leq R_{3\text{ d}} < 100\text{ mm}$	或 $R_{3\text{ d}} \geq 100\text{ mm}$
位移判据	$10\text{ mm} \leq \text{前 } 1\text{ h 位移} < 20\text{ mm}$ 或 $10\text{ mm/d} \leq \text{前 } 1\text{ d 变形}$ 速率 $< 20\text{ mm/d}$	$20\text{ mm} \leq \text{前 } 1\text{ h 位移} < 30\text{ mm}$ 或 $20\text{ mm/d} \leq \text{前 } 1\text{ d 变形}$ 速率 $< 30\text{ mm/d}$	$30\text{ mm} \leq \text{前 } 1\text{ h 位移} < 40\text{ mm}$ 或 $30\text{ mm/d} \leq \text{前 } 1\text{ d 变形}$ 速率 $< 40\text{ mm/d}$	前 $1\text{ h 位移} \geq 40\text{ mm}$ 或 前 $1\text{ d 变形速率} \geq 40\text{ mm/d}$

4 结论及下一步工作安排

(1)通过三处监测系统的建设和运行,能够实时掌握三处滑坡的变形情况、土体含水量及降雨等环境要素的状况,实现了对滑坡动向的监控。

(2)通过对实时监测数据的自动判别,可以自动预警,将相关信息发送到指定联系人。

(3)石峡口滑坡 6 号裂缝计数据和累积降雨量数据强正相关,文斗学校滑坡 4 号 GNSS 水平位移和累积降雨量数据强正相关,对降雨数据的监控,有望能够有效进行预警。

(4)三处滑坡的监测预警提供了一个地质灾害监测预警系统建设的范例,能够为地质灾害监测事业发展提供借鉴。

下一步,将开展以下工作,提高监测预警工作水平:

(1)对试运行进行及时总结,调整预警判据和预警模型,利用多监测点位、多传感器的数据综合判别方法,提高预警的成功率,降低误报率;

(2)对监测对象开展勘查和测绘,从滑坡机理方面提出监测预警的判据体系;

(3)对监测技术方法和仪器设备进行适用性评估,提出规范化的转群结合监测预警建设建议。

参考文献:

[1] 中国地质环境监测院. 全国地质灾害防治规划研究[M]. 北京:地质出版社,2008. [Chinese Institute of Geoenvironment Monitoring. Research on national plan for prevention and control of China[M]. Beijing: Geology Press, 2008. (in Chinese)]

[2] 侯圣山,李昂,韩冰,等. 四川雅安地质灾害预警预报及分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 134 – 138. [HOU S S, LI A, HAN B, et al. An approach of geo-hazard warning system in Ya'an, Sichuan and its analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25 (4): 134 – 138. (in Chinese)]

[3] 关凤峻. 地质灾害防治和地质环境保护“四大体

系”建设[J]. 中国国土资源经济, 2016, 29(10): 4 – 7. [GUAN F J. Prevention and control of geological hazards and construction of “four systems” of geological environment protection [J]. Natural Resource Economics of China, 2016, 29(10): 4 – 7. (in Chinese)]

[4] 李慧,王欣泉,宗爽. 现阶段我国地质灾害防治工作新思路——中国地质灾害防治工程行业协会“5 · 12 全国防灾减灾日”云服务活动综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 5 – 8. [LI H, WANG X Q, ZONG S. New ideas for prevention and control of geological disasters in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 5 – 8. (in Chinese)]

[5] 王春磊,徐大录. 甘肃省定西市岷县地质灾害详细调查报告[R]. 甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院, 2013. [WANG C L, XU D L. Report of detailed geo-hazard survey of Min County, Dingxi City, Gansu Province[R]. Hydrogeological Engineering Geological Survey Institute of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, 2013. (in Chinese)]

[6] 尚瑾瑜,张永军,李松. 兰州市区地质灾害发育特征及类型研究[J]. 甘肃地质, 2017, 26(3): 70 – 77. [SHANG J Y, ZHANG Y J, LI S. Development and types of the geohazards in Lanzhou City [J]. Gansu Geology, 2017, 26(3): 70 – 77. (in Chinese)]

[7] 丁继新,尚彦军,杨志法,等. 降雨型滑坡预报新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3738 – 3743. [DING J X, SHANG Y J, YANG Z F, et al. New method of predicting rainfall-induced landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3738 – 3743. (in Chinese)]

[8] 孙世国,苏振华,王杰,等. 滑坡变形组合预测方法的研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1041 – 1047. [SUN S G, SU Z H, WANG J, et al. Research on the synthetical prediction method of landslip deformation [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1041 – 1047. (in Chinese)]