

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.024

基于普适型监测的多参数预警研究 ——以三峡库区卡门子湾滑坡为例

马娟¹, 赵文祎^{1*}, 齐干¹, 刘哲儒², 邢顾莲¹, 叶思卿¹, 陈瑶¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430022)

摘要:笔者以三峡库区卡门子湾滑坡为例,介绍了此次滑坡监测预警实验选点踏勘设计,安装实施运行、监测数据实时传输、系统自动发出预警等全过程。监测数据前端采集选用普适型多参数集成监测设备(裂缝+倾角+加速度计)、雨量计、加速度计等,对“降雨+变形”等关键致灾因子开展专业化监测;通讯采用NB-IoT等公共通信网组合方式进行传输,有效降低了通信成本和设备功耗;监测数据汇聚至省级平台,并实时同步至自主研发的国家级监测预警系统,通过判据模型自动触发预警。通过近半年的系统运行,滑坡体上安装的裂缝计、加速度计等均及时捕捉到了明显的滑坡加速变形信息,初步显现了普适型设备的监测成效和预警作用。同时,系统将预警消息实时发送到相关责任人员的手机,预警结果可有效指导相关部门开展应急响应工作。

关键词:地质灾害;滑坡;监测;预警;普适型设备;三峡库区;卡门子湾滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2021)03-0259-11

Study on the Multi-parameter Early Warning Based on Universal Equipment: A Case of Kamenziwan Landslide in the Three Gorges Reservoir

MA Juan², ZHAO Wenyi^{1*}, QI Gan¹, LIU Zheru²,
XING Gulian¹, YE Siqing¹, CHEN Yao¹

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. Geological
Environmental Center of Hubei Province, Wuhan 430022, Hubei, China)

Abstract: This paper takes the Kamenziwan landslide in the Three Gorges Reservoir as a case and introduces the whole process of the landslide monitoring and early warning, such as the site selection and design of reconnaissance investigation, installation, implementation, real-time transmission of monitoring data, and automatic warning. The front-end collection of monitoring data chose the universal integrated multi-parameter monitoring equipment (crack + dip Angle + ac-

收稿日期: 2020-12-21; **修回日期:** 2021-03-15

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),课题“滑坡崩塌大数据监测预警平台研发及示范”(2019YFC1509605),“高陡斜坡无人机贴近摄影与快速布设监测预警设备研发”(2019YFC1509604)。

作者简介:马娟(1983-),女,安徽黄山人,高级工程师,主要从事地质灾害调查监测技术方法研究。E-mail: majuan@ci-gem.cn。

***通讯作者:**赵文祎(1985-),女,河南新乡人,高级工程师,主要从事地质灾害监测预警技术方法研究。E-mail: zhaowenyis-gg@126.com。

celerometer), rain gauge, accelerometer, etc for the professional monitoring of the key factors as “rainfall + deformation”. NB-LOT and other public communication network were used for data transmission, which effectively reduced the communication cost and equipment consumption. The monitoring data was aggregated to the provincial platform and synchronized to the independently developed national system timely, and the early warning was automatically triggered by the criteria model. After nearly half a year’ operation, the crack gauges and accelerometers installed on the landslide body have captured the obvious accelerated deformation information in time, showing the monitoring effect and early warning of the universal equipment. Besides, the system also sends real-time warning message to the mobile phones of relevant responsible personnel automatically which effectively guide the emergency work.

Keywords: geological hazard; landslide; monitoring; early warning; universal equipment; Three Gorges Reservoir; Kamenziwan landslide

监测预警作为地质灾害综合防治体系的重要组成部分,是减少地质灾害造成人员伤亡和财产损失的重要手段(Yueping Yin, et al. 2010)。经过多年的地质灾害调查工作,中国已基本查明 28.6 万处地灾隐患点,构建了由 30 余万人组成的群测群防队伍,初步形成了地质灾害监测预警理论技术体系和科技支持保障体系(刘艳辉等, 2015)。1999 年以来,先后在长江三峡库区、四川雅安、重庆巫山、云南哀牢山等地建立区域性国家级地质灾害监测预警示范区(Han Bing, et al. 2018; 侯圣山等, 2014; Han Bing, et al. 2020)。四川、贵州、湖北、重庆等省(市)率先实施自动化专业监测项目,取得了大量的建设经验和较好的监测预警效果。但是相对于隐患点总数,专业监测所占比率仍很低,点少面窄。

如何依托已有的群测群防和专业监测工作基础,开展“专群结合”监测预警体系建设,探索“普适型”监测之路尤为必要而迫切。以实现“专群结合”的监测预警为目标,中国地质调查局地质环境监测院联合 20 余家相关单位开展普适型监测预警仪器(简称“滑坡仪”)攻关,以“两个提高、两个降低”(提高可靠性、提高集成度、降低功耗、降低成本)为目标(李慧等, 2020),聚焦地质灾害监测中降水与地表变形 2 个主要内容(薛强等, 2018),针对性集成研发了雨量计、土壤含水率计、裂缝计、GNSS、倾角计、加速度计等 6 种普适型及多参数组合设备,基于物联网技术开发了地质灾害监测预警信息系统,组织编制了《地质灾害专群结合监测预警技术指南》等 5 部相关技术标准。为了加快推进普适型仪器设备研发与应用,首批对包括卡门子湾滑坡在内的全国 9 个省(区、市)29 处代表性地质灾害开展滑坡监测预警

实验进行样机示范试用,总体运行稳定可靠。

1 滑坡概况及发生过程

卡门子湾滑坡位于湖北省秭归县泄滩乡陈家湾村 7 组,距乡政府约 3.5 km,距三峡大坝约 50 km。卡门子湾滑坡位于长江支流泄滩河左侧,地理坐标 E: $110^{\circ}36'50''$, N: $31^{\circ}01'27''$ 。滑坡前缘高程约 160 m,后缘高程约 290 m,地形坡度 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,坡向 315° ,坡体中前部有上泄公路穿过。滑坡整体纵长约 192 m,横宽约 135 m,面积约 $2.7\times 10^4\text{ m}^2$,厚度 10~25 m,总体积约 $50\times 10^4\text{ m}^3$,主滑方向 350° 。滑坡主要由滑动区和牵引区组成,滑动区纵长约 154 m,横宽约 135 m,面积约 $1.9\times 10^4\text{ m}^2$,滑体厚度 15~25 m,滑动体约 $38\times 10^4\text{ m}^3$;牵引区面积约 $0.8\times 10^4\text{ m}^2$,滑体厚度 10~20 m,体积约 $12\times 10^4\text{ m}^3$ 。滑坡出露岩体为中侏罗统沙镇溪组(J_2s)紫红色薄层粉砂岩、含碳泥质粉砂岩与青灰绿色粉砂质泥岩不等厚互层,岩层产状 $30^{\circ}\angle 40^{\circ}$,该滑坡主要为坡体上部粉砂岩、含碳泥质粉砂岩沿粉砂质泥岩滑移(Yueping Yin, et al. 2020)。

2019 年 10 月底三峡水库蓄水至 175 m 高水位后,于 11 月 20 日,该滑坡公路上下区域发现变形裂缝;于 11 月 29 日滑坡出现明显变形迹象;滑坡体呈现沿粉砂质泥岩(软弱面)滑移现象,与岩层倾向一致,滑坡南侧出现一条拉张裂缝,裂缝走向 315° ,缝宽 10~25 cm;同时,因坡体坡度较陡,滑坡体在重力作用下,向临空面滑移,方向 315° ,与坡向一致,并使滑坡中部南侧陡坎处粉砂岩沿粉砂质泥岩顶面外移 20 cm,滑坡后缘出现一条弧形拉张裂缝,裂缝

呈走向 $150^{\circ}\sim 225^{\circ}\sim 275^{\circ}$,缝宽 $5\sim 25\text{ cm}$,前缘局部下座 $5\sim 30\text{ cm}$,裂缝可见深度 1.2 m ;12 月 9 日滑坡出现加速变形,后缘裂缝单日下座变形量达 20 cm ,滑体中部出现多条横向裂缝,滑坡左侧及后缘裂缝完全贯通,滑坡单日中前部道路变形约 17 cm ,滑坡前缘临江部位出现臃胀隆起变形,左侧边界滑移面变形错动增大约 12 cm 。

2019 年 12 月 10 日上午,该滑坡两侧及后缘裂缝已完全贯通,且以 0.8 cm/h 的速度加速变形。左侧边界处公路上方岩体不断掉块,且发出岩体摩擦、破裂声音;于当日下午 16 点 50 分,该滑坡出现整体滑动,导致 005 乡道错断,水平推移约 15 m ,损毁道路长度约 135 m ,部分滑体涌入江中,未堵塞河道。滑坡整体滑动后,后部牵引变形裂缝仍在向斜坡上部新建公路(万家-翁家湾公路)方向扩展,至晚上 18 点,该裂缝已延伸至上方公路,出现路面开裂现象(图 1、图 2);至 11 日上午 9 点,该裂缝不断扩张,最大宽度约 12 cm ,下沉约 7 cm ,且还在不断发展变形中。后部牵引区变形明显,后缘裂缝最大宽度约 12 cm ,内侧下沉约 7 cm ,处于不稳定状态,后期存在下滑的可能(图 3、图 4)。一旦后部牵引区下滑加载后,在库水位上升作用下,不排除二次整体滑移的可能(王金波,2020)。

2 基于地质分析的监测网络建设

卡门子湾滑坡发生后,中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心)(以下简称“院(中



(2019 年 12 月 10 日,据王金波,2020)

图 1 滑坡左侧边界滑移图

Fig. 1 Slide on left boundary (Dec. 10, 2020)



(2019 年 12 月 10 日,据王金波,2020)

图 2 前部路面拉张裂缝图

Fig. 2 Front road tension crack (Dec. 10, 2020)



(2019 年 12 月 11 日,据王金波,2020)

图 3 牵引区后缘拉张裂缝图

Fig. 3 Tensile crack at trailing edge of traction zone (Dec. 11, 2020)

心)”联合湖北省地质环境总站等单位进行现场应急调查。通过对该滑坡地质条件分析研究制定了普适型设备监测方案。12 月 22 日起在该处开展了现场设备安装布设工作,在坡体共计安装雨量计、多参数、



(2020 年 12 月 11 日,据王金波,2020)

图 4 滑坡左侧变形图

Fig. 4 The left slope deformation after sliding(Dec. 11,2020)

加速度计等 3 类 16 套监测设备,剖面布设采用“一纵一横”的布设方式(图 5)。重点监测区域为后部

牵引区。其中滑体上布设 9 套形变监测设备,含 8 套倾角加速度计,1 套多参数监测仪;牵引区布设 6 套形变监测设备,含 4 套倾角加速度计,2 套多参数监测仪;滑坡周界上布置压电式雨量计 1 套,布设于滑坡体屋顶上(图 6、图 7)。

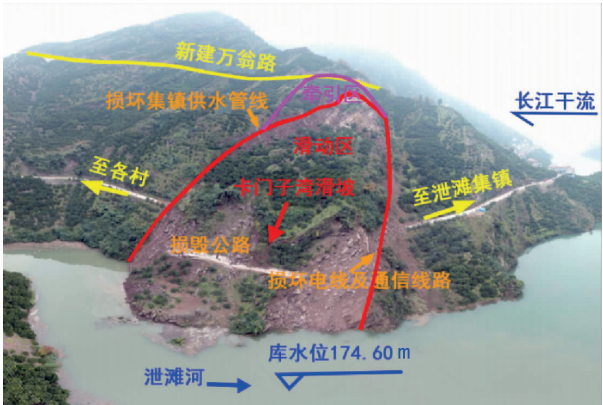
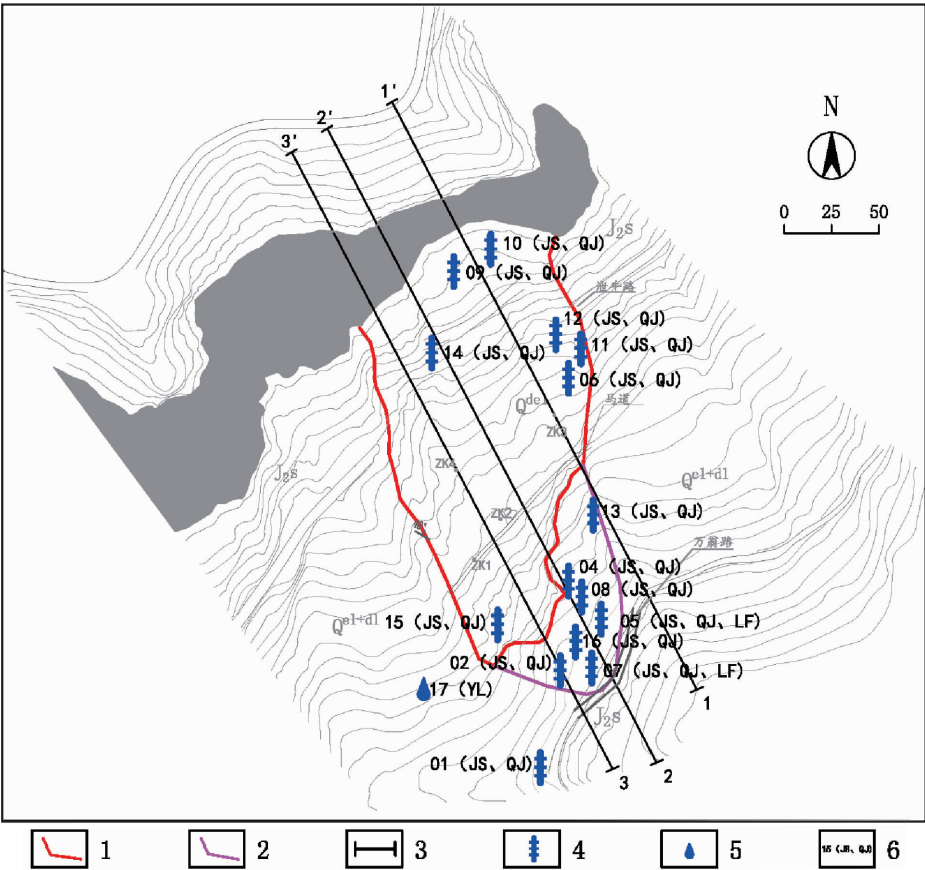


图 5 卡门子湾滑坡全貌(据王金波,2020)

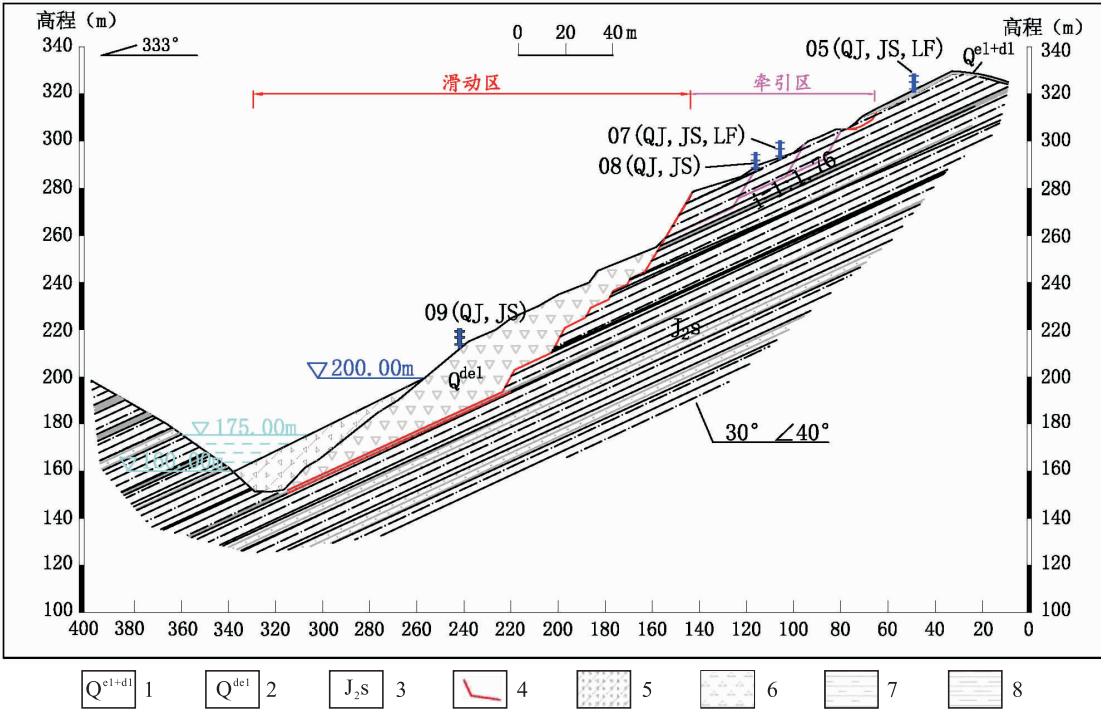
Fig. 5 Full view of Kamenziwan Landslide



1. 滑动区;2. 牵引区;3. 剖面线;4. 多参数监测设备;6. 设备编号

图 6 卡门子湾滑坡监测平面布置示意图

Fig. 6 Monitoring equipment layout of Kamenziwan landslide



1. 第四系残坡积;2. 第四系滑坡堆积;3. 侏罗纪中统沙溪庙组;4. 滑动面;5. 碎石土块;6. 块裂岩;7. 泥质粉砂岩;8. 粉砂质泥岩

图 7 卡门子湾滑坡监测方案剖面图

Fig. 7 Monitoring deployment profile of Kamenziwan landslide

2.1 监测设备选型

卡门子湾滑坡以监测变形和降雨为主,具体包括裂缝、倾角、加速度、雨量等测项,裂缝测项用于监测滑坡体裂缝扩展,倾角测项用于监测滑坡体多级旋转,加

速度测项用于监测滑坡运动状态。选用了东方智感(浙江)科技股份有限公司、上海华测导航技术股份有限公司、上海展为智能技术股份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表 1 所示。

表 1 卡门子滑坡监测仪器实施表

Tab. 1 Implementation of Kamenziwan landslide monitoring instrument

地质灾害名称	地理位置	仪器设备类型及数量	技术参数	安装布设位置
卡门子湾滑坡	秭归县泄滩乡陈家湾村 7 组,位于长江支流泄滩河左侧	3 套普适型多参数监测仪(裂缝+倾角+加速度计)	测量范围:0~50/100//200/500 cm、±30°、±2g;测量精度±0.1%F•S、±0.1°、±1 mg;通讯:NB-lot/2/4/5G;工作温度-20℃~+65℃,高寒地区定制;防护等级:IP66;供电方式:按需供电方式,满足连续 30 个阴雨日正常工作;支持无线网关集成安装	裂缝变形处
		12 处普适型倾角加速度计	测量范围:±30°、±2 g;测量精度:±0.1°、±1 mg;通讯:NB-lot/2/4/5G;工作温度-20℃~+65℃,高寒地区定制;防护等级:IP67;供电方式:按需供电方式,满足连续 30 个阴雨日正常工作;支持无线网关集成安装	滑坡变形区
		1 台普适型雨量计	测量范围:0~8 mm/min(毫米/分);测量精度±4%;分辨率:0.2 mm;通讯:NB-lot/2/4/5G;工作温度 0~+65℃高寒地区定制;防护等级 IP65 以上;供电方式:按需供电方式,满足连续 30 个阴雨日正常工作;支持无线网关集成安装	滑坡区房顶

2.2 监测预警试运行

设备安装完毕后,整个监测网络进入试运行状态。普适型多参数设备(裂缝+倾角+加速度计)和普适型雨量计通过 4G 公共通信网发送监测数据;普适型倾角加速度计通过 NB-lot 窄带物联网传输监测数据。监测数据汇聚到湖北省地质环境监测总站“湖北省地质环境综合信息平台”,并实时同步数据至中国地质环境监测院“全国地质灾害监测预警信息系统”。2 套系统均提供前端数据管理和多测

项分析功能;同时能够设置单参数预警判据和多参数组合预警模型指标,进行监测数据实时计算,自动发布预警消息,并根据预警等级及地质灾害波及的范围进行短信发送。目前单参数判据针对主要变形特征与影响因素对地质灾害监测时序大数据进行分析(张茂省等,2019;刘颖莹等,2018)(表 2),基于滑坡孕灾、发灾、成灾等方面的科学认识,建立测项之间的关联关系,形成多参数组合预警模型(贾俊等,2019;段钊等,2018)。

表 2 系统主要测项单参数预警判据表达式表
Tab. 2 Single parameter early warning criterion of the main test item

测 项	判 据 表 达 式
雨 量	降雨量: $P_N \geq R_s, N \in N_+$, 其中 P_N 为当前时刻向历史回溯 N 小时(日)降雨量,单位(mm), R_s 为降雨量阈值,单位(mm)
	连续 N 日有效降雨量: $\sum_{n=1}^N P_N b_n \geq R_s, n \in N_+$, 其中 P_N 为当前时刻向历史回溯第 n 日降雨量,单位(mm), b_n 为当前时刻向历史回溯第 n 日降雨量权重值 ($b_n \in R$), R_s 为降雨量阈值,单位(mm)
裂 缝	变形速率: $v \geq F_v$, 其中 v 为裂缝变形速率,单位(mm/h(d)(w)), F_v 为裂缝变形速率阈值,单位(mm/h(d)(w))
	变形量(一定时长内变形量): $F_N \geq F_s, N \in N_+$, 其中 F_N 为 N 小时(日)(周)裂缝变形量,单位(mm), F_s 为裂缝变形量阈值,单位(mm)
	连续变形: $\min \{v_1, v_2, \dots, v_N\} \geq F_v, N \in N_+$, 其中 v_N 为当前时刻向历史回溯第 N 小时(日)的裂缝变形速率,单位(mm/h(d)), F_v 为裂缝变形速率阈值,单位(mm/h(d))
GNSS	切线角: $\theta = \arctan \frac{\Delta F}{1}, \theta \times \frac{180^\circ}{\pi} \geq F_a$, 其中 ΔF 为当前时刻向历史回溯 1 日裂缝变形量,单位(mm), F_a 为切线角阈值,单位($^\circ$)
	变形速率: $(\epsilon_h \geq G_{hv}) \vee (\epsilon_v \geq G_{vv}) \vee (\epsilon_c \geq G_{cv}) = 1$, 其中 $\epsilon_h, \epsilon_v, \epsilon_c$ 分别为 GNSS 水平、垂直、综合位移变形速率, G_{hv}, G_{vv}, G_{cv} 分别为 GNSS 水平、垂直、综合位移变形速率阈值,单位(mm/h(d)(w))
	变形量(一定时长内变形量): $(d_{Nh} \geq G_{hs}) \vee (d_{Nv} \geq G_{vs}) \vee (d_{Nc} \geq G_{cs}) = 1, N \in N_+$, 其中 d_{Nh}, d_{Nv}, d_{Nc} 分别为 N 小时(日)(周)GNSS 水平、垂直、综合位移变形量, G_{hs}, G_{vs}, G_{cs} 分别为 GNSS 水平、垂直、综合位移变形量阈值,单位(mm)
	连续变形: $\bigwedge_{n=1}^N [(\epsilon_{Nh} \geq G_{hv}) \vee (\epsilon_{Nv} \geq G_{vv}) \vee (\epsilon_{Nc} \geq G_{cv})] = 1, n \in N_+$, 其中 $\epsilon_{Nh}, \epsilon_{Nv}, \epsilon_{Nc}$ 分别为当前时刻向历史回溯第 N 时(日)GNSS 水平、垂直、综合位移变形速率, G_{hv}, G_{vv}, G_{cv} 分别为 GNSS 水平、垂直、综合位移变形速率阈值,单位(mm/h(d))
	切线角: $(\frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{\Delta dh}{1} \geq G_{ha}) \vee (\frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{\Delta dv}{1} \geq G_{va}) \vee (\frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{\Delta dc}{1} \geq G_{ca}) = 1$, 其中 $\Delta d_h, \Delta d_v, \Delta d_c$ 分别为当前时刻向历史回溯 1 日水平、垂直、综合变形量, G_{ha}, G_{va}, G_{ca} 分别为 GNSS 水平、垂直、综合位移切线角阈值

注:阈值需根据现场调勘查情况设置红、橙、黄、蓝四级,计算时算法从红色预警开始逐级向低级别计算。

2.3 预警指标设置及监测数据分析

该滑坡为典型的顺向岩质滑坡,预警判据主要采用岩质滑坡的判据。本研究将累计位移变形速率与时间曲线与降雨量历程图进行对比分析,发现滑坡变形与降雨有着密切的关系,且用相关性函数计算出历史监测数据裂缝累计位移与累计降雨量的关

系系数为 0.988 066。所以在设置模型的时候主要聚焦“变形”和“雨量”设置了模型参数。降雨判据是利用 1 小时降雨量、3 日有效降雨量等指标进行判断。位移判据是利用日裂缝位移变化量,并综合降雨指标进行综合判断。卡门子湾滑坡监测预警模型降雨和位移判据指标见表 3。

表 3 卡门子湾滑坡监测预警模型表

Tab. 3 Monitoring and warning model of Kamenziwan landslide

预警级别	蓝色	黄色	橙色	红色
降雨判据	1 时雨量值 ≥ 10 mm	1 时雨量值 ≥ 30 mm	$[(\text{历史 } 0 \sim 24 \text{ 小时}) * 1 + (\text{历史 } 24 \sim 48 \text{ 小时}) * 0.8 + (\text{历史 } 48 \sim 72 \text{ 小时}) * 0.5] \geq 60 \text{ mm}$	$[(\text{历史 } 0 \sim 24 \text{ 小时}) * 1 + (\text{历史 } 24 \sim 48 \text{ 小时}) * 0.8 + (\text{历史 } 48 \sim 72 \text{ 小时}) * 0.5] \geq 80 \text{ mm}$
位移判据	24 小时裂缝值 ≥ 10 mm	24 小时裂缝值 ≥ 15 mm	24 小时裂缝值 ≥ 25 mm	24 小时裂缝值 ≥ 40 mm

2020 年 4 月 17 日以来滑坡区域出现大到暴雨，至 20 日中午累计雨量达 66.2 mm(图 8)，所安装的滑坡监测预警仪等均捕捉到裂缝加大、倾角突变等明显的滑坡变形错动信息(图 8、图 9、图 10、图 11)。

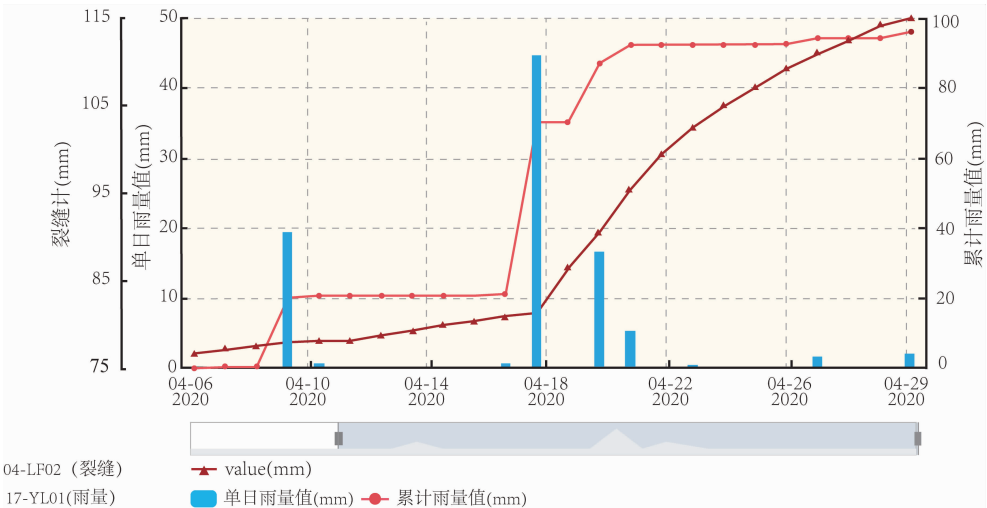


图 8 04-LF02 与 17-YL01 裂缝雨量综合分析曲线图(2020 年 4 月 6 日—29 日)

Fig. 8 Comprehensive curve of 04-LF02 and 17-YL01 (April 6-29, 2020)

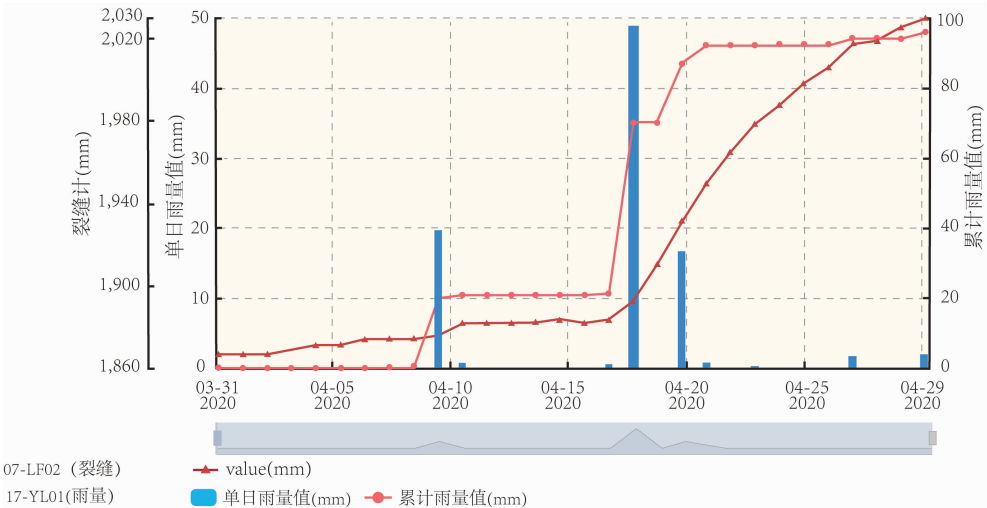


图 9 07-LF02 与 17-YL01 裂缝雨量综合分析曲线图(2020 年 3 月 31 日—4 月 29 日)

Fig. 9 Comprehensive curve of 07-LF02 and 17-YL01 (March 31-April 29, 2020)

20 日 07 号裂缝变形量达 21.2 mm,且连续 5 天变形量都在 10 mm 以上。从图 10、11 可以看出,该滑坡位于前缘的 14 号倾角计和位于滑坡后缘的 01 号倾角同时发生突变。07 号裂缝 4 月 19 日、20 日连续发出黄色预警。

4 月 20 日下午,根据普适型监测设备反馈信息,随即召开国家-省-市-县多级视频云会商会,实时在线化分析综合研判滑坡的变形现状和发展趋势。一致认为滑坡有变形加剧趋势,鉴于该滑坡为三峡库区“跨线”滑坡,正值库水位消落期,加之滑坡

影响区“伦晚”脐橙成熟采摘季,确定预警等级为黄色。

2.4 基于长期监测滑坡趋势分析及处置对策

通过分析 04LF02 裂缝数据稳定安装后的变化趋势(图 12),整体上明显分为 3 个阶段。第一阶段是 1 月 8 日~2 月 27 日(2020 年),第二阶段 2 月 29 日~4 月 18 日(2020 年),第三阶段 4 月 19 日~6 月 8 日(2020 年)。3 个阶段的斜率逐步增大。为了量化分析,本研究将该部分数据以日为量纲,求出日变形速率和切线角(图 13)(许强等,2008,2009)。通

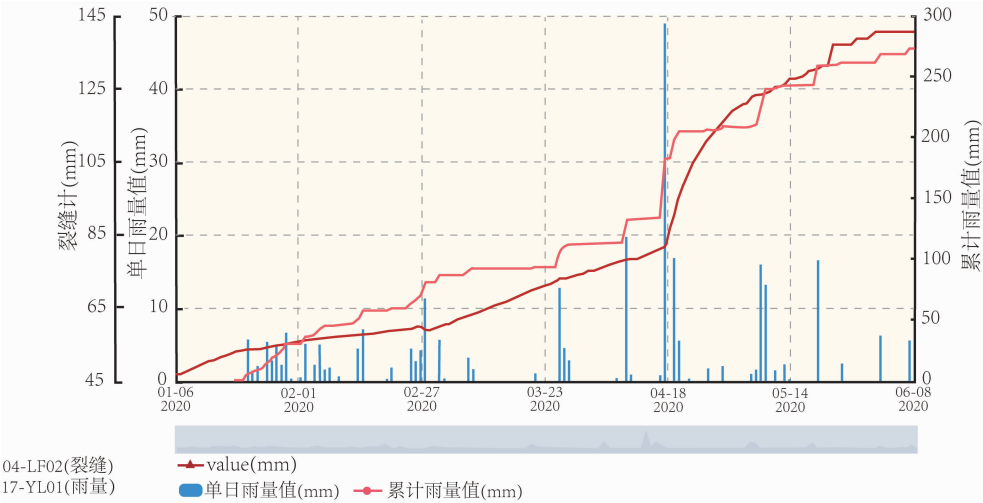


图 12 04LF02 与 17-YL01 裂缝雨量综合分析曲线图(2020 年 1 月 7 日—6 月 9 日)

Fig. 12 Comprehensive curve of 04LF02 and 17-YL01(Jan 7 - June 9, 2020)

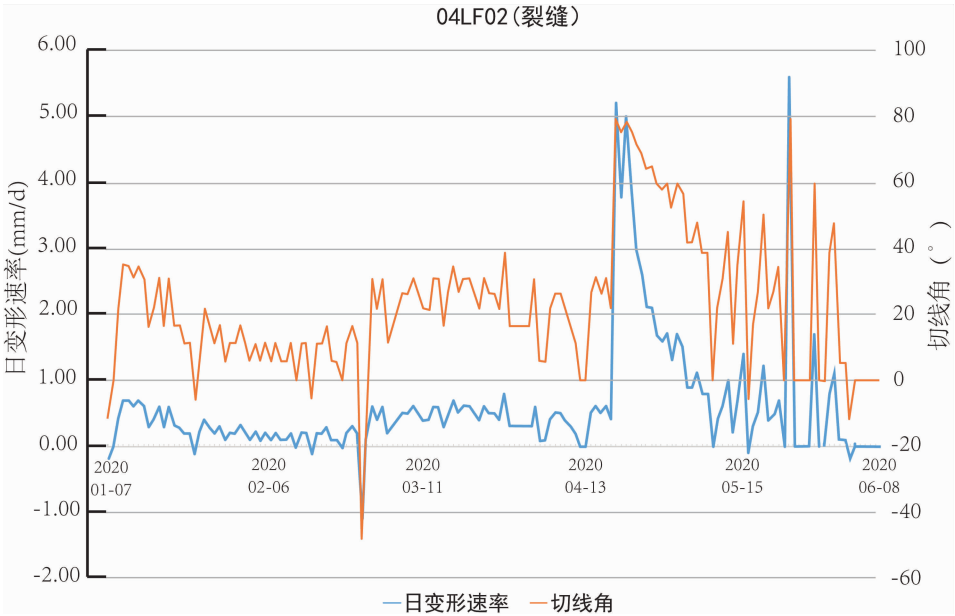


图 13 04LF02 日变形速率与切线角曲线图(2020 年 1 月 7 日—6 月 9 日)

Fig. 13 04LF02 Daily Deformation rate and Tangent Angle Curve(Jan 7 - Jun 9, 2020)

过切线角分析(剔除设备 2 月 28 日的异常波动),角度值与 3 个阶段基本吻合。第一阶段角度值绝大部分落在($5^{\circ}\sim 20^{\circ}$)以内,第二阶段角度值绝大部分落在($20^{\circ}\sim 25^{\circ}$)以内,第三阶段的角度值($45^{\circ}\sim 60^{\circ}$)以内。根据斋藤曲线变形阶段划分(Saito M, 1969),当切线角 $<45^{\circ}$ 时,斜坡处于初始变形阶段;当切线角 $=45^{\circ}$ 时,斜坡处于等速变形阶段;当切线角 $>45^{\circ}$ 时,斜坡处于加速变形阶段。故判断卡门子湾滑坡处于加速变形阶段。稳定运行近半年来,先后触发了 21 次预警,均为裂缝触发预警,其中红色预警 7 次,黄色预警 5 次,蓝色预警 9 次,其中触发预警的约 80%为设备数据波动导致。根据长期监测滑坡趋势分析,牵引区变形仍进一步扩展,处于不稳定状态,在降雨等不利因素影响下,牵引区存在继续下滑的可能。由于该滑坡距三峡大坝约 50 km,一旦下滑后果较严重,建议地方对该滑坡进行治理。

3 结论

笔者通过对三峡库区卡门子湾滑坡开展普适型多参数设备监测、系统运行和智能分析,实现了对滑坡的整体监控,并成功预警,及时有效指导了三峡库区地质灾害防治工作。

(1)从卡门子湾滑坡的运行情况分析,普适型监测仪器可满足滑坡监测的需求,通过对关键因素“雨量”和“变形”的监测,可实现滑坡预警。

(2)裂缝计和雨量计的数据相关性很强,日降雨量达到大雨级别后,日裂缝出现较明显变形,同时倾角发生突变,通过对雨量、裂缝、倾角等关联分析,可实现精度更高的多参数预警。

(3)基于物联网、大数据分析、机器学习等技术研发的全国地质灾害监测预警信息系统具备仪器运管、数据聚合、预警分析、响应处置等功能,可满足对灾害对象自动、连续、实时地监测需求,实现监测预警工作“建-管-运”全流程信息化管理。

参考文献(References):

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 Shengshan, LI Ang, HAN Bing, 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.

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(3).

LI Hui, WANG Xinquan, ZONG Shuang. New ideas on the prevention and control of geological disasters in China at the present stage- China Association of geological disaster prevention and control engineering” Summary of cloud service activities of “May 12 national day for disaster prevention and reduction” [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020(3).

刘艳辉,刘传正,温铭生,等. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 738-746.

LIU Yanhui, LIU Chuazheng, WEN Minsheng, et al. Study of early warning models for regional Geo-Hazards in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 738-746.

张茂省. 发挥新型举国体制优势 提高地质灾害防治能力[J]. 西北地质, 2019, 52(2): I-II.

ZHANG Maosheng. Maximising the Advantages of the New National System for Improving the Ability to Prevent and Mitigate Geological Disasters[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): I-II.

张茂省,贾俊,王毅,等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设[J]. 西北地质, 2019(2): 109-122.

ZHANG Maosheng, JIA Jun, WANG Yi, et al. Construction of Geological Disaster Prevention and Control System Based on AI [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 103-116.

贾俊,张茂省,冯立,等. 流态破坏型黄土滑坡滑带土临界特征[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 136-147.

JIA Jun, ZHANG Maosheng, FENG Li. et al. Critical Characteristics of Slip Zone Soil in Loess Landslide with Flow Failure Pattern[J]. Northwestern Geology, 2019,

52(2):136-147.

王金波. 卡门子湾滑坡调查情况报告[R]. 湖北:湖北省地质局水文地质工程地质大队,2020.

WANG Jinbo. Investigation report on karmenziwan landslide [R]. Hubei: Hydrogeology Engineering Geology Team, Hubei Geological Bureau,2020.

薛强,张茂省. 延安淹土安滑坡监测预警及变形特征[J]. 西北地质,2018,51(2):220-226.

XUE Qiang, ZHANG Maosheng. Monitoring, Early Warning and Deformation Characteristics of Yantu'an Landslide in Yan'an[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2):220-226.

刘颖莹,谢婉丽,朱桦,等. 陕西泾阳地区黄土固结湿陷试验及预测模型研究[J]. 西北地质,2018,51(2):227-233.

LIU Yingying, XIE Wanli, ZHU Hua, et al. Study on Loess Consolidation Collapse Test and Prediction Model in Jingyang District, Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2):227-233.

许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1104-1112.

XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2008, 27(6):1104-1112.

段钊,彭建兵,陈伟,等. 泾河下游黄土台塬区滑崩灾害空间分异研究[J]. 西北地质,2018,51(3):214-222.

DUAN Zhao, PENG Jianbing, CHEN Wei, et al. Distribution Difference of Landslide and Collapse in the Loess Tableland Area at the Downstream of Jing River[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3):214-222.

许强,曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(6):1009-1106.

XU Qiang, ZENG Yuping. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009, 28(6):1009-1106.

Saito M. Research on forecasting the time of occurrence of slope failure[J]. Soils and Foundations, 1969, 17(2):29-38.

Yueping Yin, Hongde Wang, Youlong Gao, et al. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2010, 7:339-349.

Yueping Yin, Bolin Huang, Quan Zhang, et al. Research on recently occurred reservoir-induced Kamenziwan rockslide in Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2020, 17, 1935-1949.

Han B, Tong B, Yan J, et al. The Monitoring-Based Analysis on Deformation-Controlling Factors and Slope Stability of Reservoir Landslide: Hongyanzi Landslide in the Southwest of China[J]. Geofluids, 2018, 2018:1-14.