

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.208

引用格式: 连志鹏, 陈宇, 章昱, 等. 普适型滑坡地质灾害监测预警——以湖南省溆浦县为例[J]. 中国地质调查, 2025, 12(1): 140–149. (Lian Z P, Chen Y, Zhang Y, et al. Universal monitoring and early warning for landslide geological hazard: A case study of Xupu County in Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 140–149.)

普适型滑坡地质灾害监测预警

——以湖南省溆浦县为例

连志鹏^{1,2}, 陈宇^{1,2}, 章昱^{1,2}, 厉一宁^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 谭建民^{1,2}

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质学会中南地区地质安全风险监测预警与防控技术创新基地, 湖北 武汉 430205)

摘要: 为了满足普适型地质灾害监测预警工作的应用推广需求, 以湖南省溆浦县 40 处滑坡地质灾害普适型监测预警示范点建设为例, 介绍了普适型监测预警示范点建设与监测预警系统运行的全过程。根据研究区滑坡地质灾害发育特征、成灾模式和致灾特点, 选取了 40 处监测预警示范点, 选用雨量计、裂缝计、GNSS 位移计、含水率计、倾角加速度计普适型设备, 对监测预警示范点的变形特征、影响因素、滑动前兆等关键指标开展专业化监测; 聚焦雨量和变形, 采用 Pearson 模型和监测数据分析的方法分别提出了研究区雨量判据和变形判据, 建立了监测预警模型; 监测数据汇聚至系统平台, 通过判据模型自动触发预警, 并发送预警信息。以湾里滑坡为典型点, 对监测部署方案和监测数据进行了分析, 实时掌握了降雨特征、滑坡的变形特征及两者的相关特性, 初步显现了普适型设备的监测成效和预警作用。研究成果可对普适型监测预警工作的推广应用提供技术支撑, 同时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; 普适型设备; 监测; 预警

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)01–0140–10

0 引言

我国是世界上地质灾害最严重的国家之一, 滑坡灾害因其具有多发性、频发性和严重破坏性的灾害特征, 已成为地质灾害中的一种重要灾种^[1–2], 其失稳破坏的后果严重威胁到人民的生命和财产安全。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^[3–4]。20 世纪 80 年代以来, 我国先后在长江三峡库区、四川雅安、云南哀牢山等地建立了区域和典型地质灾害的监测预警示范^[5–6]。2014 年以来, 四川、贵州、湖北、重庆等省(市)开展了监测预警建设, 建设了数百处地质灾害监测系统, 取得了较好的监测预警效

果^[7], 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。

近年来, 我国科学技术迅猛发展, 尤其是遥感技术、无线通讯技术及各类感知技术的不断发展, 地质灾害隐患早期识别与监测预警已成为主动防控地质灾害的重要手段^[8–9]。2020 年开始, 自然资源部统筹部署了全国地质灾害监测预警实验工作, 旨在解决地质灾害“什么时候发生”的问题, 提前预警^[10]。本文围绕地质灾害监测预警实验工作的运行与应用推广需求, 以中国地质调查局武汉地质调查中心在湖南省溆浦县建设的 40 处滑坡灾害监测预警系统建设为例, 开展调查选点、设备选型与系统运行工作, 示范应用普适型地质灾害监测预警新模式, 旨在为华中山地丘陵区地质灾害监测预警与防灾减灾工作提供科学依据。

收稿日期: 2024–05–10; 修订日期: 2024–10–29。

基金项目: 中国地质调查局“华中山地丘陵区地质灾害智能监测预警系统应用示范(编号: DD20230444)”项目资助。

第一作者简介: 连志鹏(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害风险调查评价与监测预警研究方面的工作。Email: 119593730@qq.com。

1 研究区概况

湖南省溆浦县地处雪峰山脉北麓的延伸地区,四周层峦叠嶂。境内地形以中低山、丘陵地形为主,间有冲沟分布,总体地势为东南高西北低,由南向北西方向倾斜,南部地势最高,东部高于北部,西部次之,中部地势低平,成盆地状(图1)。溆浦县属中亚热带季风湿润气候,降雨量东南多、西部少、山地多、平丘少,多年平均降雨量为1 384.9 mm,时空变化大、季节分配不均,全年有45%的降雨多集中在4—6月,灾害性天气频繁,有利于滑坡等地质灾害的形成。据调查统计,研究区共发育各类地质灾害456处,其中滑坡358处、崩塌24处、泥石流9处、不稳定斜坡47处、地面塌陷地质灾害18处,以中、小型滑坡灾害为主^[11]。

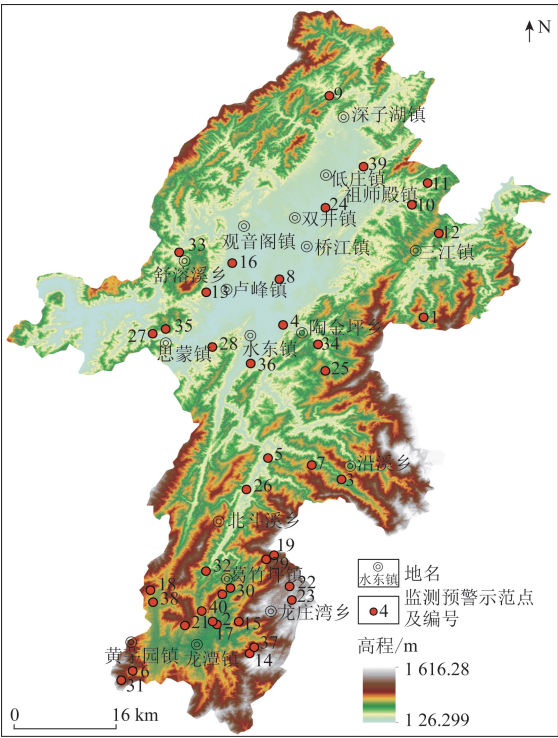


图1 研究区地质简图及普适型监测预警示范点分布
Fig.1 Geological sketch of the study area and distribution of universal monitoring and early warning demonstration points

2 技术路线

在监测预警需求导向分析和地质灾害已有资料收集、资料综合分析基础上,对研究区滑坡开展

调查选点,研究其孕灾环境与成灾模式,应用雨量计、裂缝计、GNSS 位移计、含水率计、倾角加速度计监测设备,开展滑坡地质灾害普适型监测预警。聚焦地质灾害智能监测预警中数据、判据、模型等关键技术,通过综合分析监测数据,预测滑坡的稳定性趋势,示范应用“人防+技防”的普适型地质灾害监测预警新模式,支撑和服务地方地质灾害防灾减灾工作(图2)。

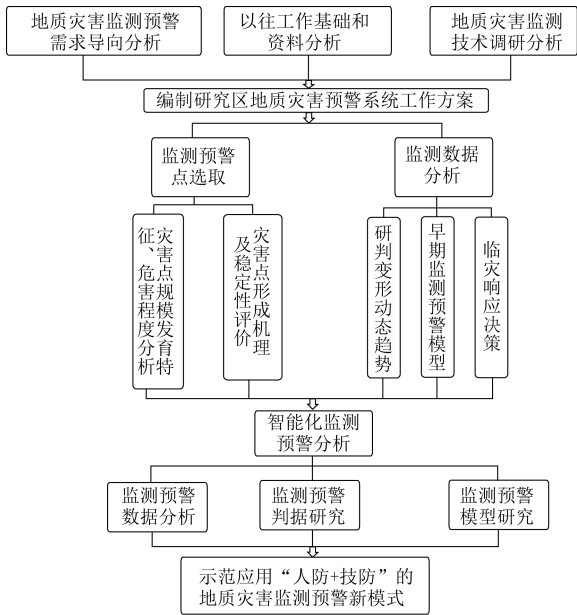


图2 普适型地质灾害监测预警技术路线
Fig.2 Technical route for universal geological disaster monitoring and early warning

3 监测预警示范点

3.1 选点

溆浦县是湖南省怀化市地质灾害最严重的区县之一,本研究对区内灾害点地质环境条件和灾害特征进行了分析。研究区属典型的山地丘陵区地貌,区内大面积出露侏罗系砂泥岩地层、浅变质砂质板岩地层、花岗岩地层,为区内易滑地层。滑坡为区内最主要的地质灾害,以土质滑坡为主,岩质滑坡不发育,降雨是滑坡主要的诱发因素。通过系统性的分析研究,研究区土质滑坡的成灾模式主要有3类:沿基覆界面滑移型、浅表层滑动型、陡坡塌滑型(表1)。

根据研究区滑坡地质灾害发育特征及成灾模式,重点选择群测群防难度大、变形破坏明显、致灾风险高的土质滑坡开展监测预警^[12]。通过现场踏

勘及调查,确定了 40 处滑坡灾害点开展普适型监测预警,如图 1、表 2 所示。

表 1 研究区土质滑坡成灾模式

Tab.1 Soil landslide disaster mode in the study area

滑坡类型	成灾模式	致灾特点
沿基覆界面滑移型	该类滑坡多发生在由砂页岩、砂泥岩岩组及变质岩岩组构成的地形坡度为 20°~25°的斜坡中,坡体结构为顺向等倾的更易发生滑坡。斜坡坡角多因切坡有基岩出露,但斜坡主体仍为残积土层,因为基岩顶面相对与土体来说更隔水,容易造成地下水在基覆界面汇集,从而浸泡和软化接触带附近土体,易产生上覆残坡积土层沿下伏基岩顶面的滑动变形。滑坡形成初期往往表现为斜坡后缘发育拉裂缝,随着变形进一步发展,斜坡下半部分逐渐膨胀、隆起,在极限降雨条件下,潜在滑移面被剪断贯通,形成滑坡	该类型滑坡一般规模较大,对滑坡体内及坡前的建筑物破坏性较强,致灾性大
浅表层滑动型	该类型滑坡主要发生由花岗岩岩组、砂页岩岩组及变质岩岩组构成的坡度为 25°~30°的斜坡中。滑体物质多为表层残坡积黏土、亚黏土与下层碎裂散体状全-强风化碎石的混合物,结构松散,厚度较薄。在持续强降雨条件下,浅表层土体饱水后强度降低,自重增大,沿边坡顶部产生小规模滑动	该类型滑坡多数规模小,致灾性小,滑坡体堆积于房后或对房屋后墙造成破坏,主要危及房屋后墙及路边行人、车辆
陡坡塌滑型	该类型滑坡主要发生由花岗岩岩组、变质岩岩组构成的坡度为 30°~45°的陡坡中。原始斜坡表层岩土体在长时间风化作用下,裂隙发育,表层岩土体松散破碎。强降雨入渗导致坡体物质自重增加,坡体表层土体吸水处于饱和状态,坡体上部被裂隙分割的岩土体首先发生塌滑,滑塌岩土体冲击坡体下部松散岩土体,使得下部松散岩土体发生滑动破坏	该类型滑坡突发性强、速度快、冲击力强,致灾性高,易摧毁并掩盖房屋和道路

表 2 研究区监测预警示范点特征

Tab.2 Characteristics of monitoring and early warning demonstration points in the study area

示范点编号	隐患点名称	类型	规模	稳定性	威胁人数/人	威胁财产/万元	成灾模式
1	祠屋下滑坡	滑坡	小型	不稳定	60	130	沿基覆界面滑移型
2	红岩村 1 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	41	300	沿基覆界面滑移型
3	梅子坪滑坡	滑坡	小型	不稳定	20	30	沿基覆界面滑移型
4	绿化社区 8 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	31	90	沿基覆界面滑移型
5	红花村 3 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	26	60	沿基覆界面滑移型
6	油麻村 21 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	60	350	沿基覆界面滑移型
7	过江坡村 7 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	22	200	沿基覆界面滑移型
8	河上坡村滑坡	滑坡	小型	不稳定	20	138	浅表层滑动型
9	刘家坪村 6 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	64	120	沿基覆界面滑移型
10	令吉冲村 12 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	33	80	浅表层滑动型
11	青龙溪滑坡	滑坡	小型	不稳定	31	95	陡坡塌滑型
12	金兰村 12 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	25	78	浅表层滑动型
13	红花园村 7、8 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	21	50	沿基覆界面滑移型
14	红岩村 6 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	29	100	沿基覆界面滑移型
15	圭洞村 25 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	42	120	浅表层滑动型
16	哑塘村 19 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	198	150	沿基覆界面滑移型
17	彭家滑坡	滑坡	小型	不稳定	45	100	沿基覆界面滑移型
18	杨梅冲滑坡	滑坡	小型	不稳定	18	60	浅表层滑动型
19	湖南田滑坡	滑坡	小型	不稳定	52	70	沿基覆界面滑移型
20	合堂湾滑坡	滑坡	小型	不稳定	28	100	沿基覆界面滑移型
21	笕箕湾滑坡	滑坡	小型	不稳定	48	200	沿基覆界面滑移型
22	打戈垅组滑坡	滑坡	小型	不稳定	32	100	陡坡塌滑型
23	金龙组滑坡	滑坡	小型	不稳定	21	60	沿基覆界面滑移型
24	洞底湾滑坡	滑坡	小型	不稳定	54	180	浅表层滑动型
25	老鸭田滑坡	滑坡	小型	不稳定	12	60	陡坡塌滑型
26	叶家湾滑坡	滑坡	小型	不稳定	29	40	沿基覆界面滑移型
27	半山滑坡	滑坡	中型	不稳定	30	40	沿基覆界面滑移型
28	麻叶冲滑坡	滑坡	小型	不稳定	96	60	沿基覆界面滑移型
29	鸭坝塘滑坡	滑坡	小型	不稳定	35	150	沿基覆界面滑移型
30	岩背滑坡	滑坡	小型	不稳定	88	700	沿基覆界面滑移型
31	烂屋场滑坡	滑坡	小型	不稳定	77	200	沿基覆界面滑移型
32	湾里滑坡	滑坡	小型	不稳定	43	150	沿基覆界面滑移型

续表

示范点编号	隐患点名称	类型	规模	稳定性	威胁人数/人	威胁财产/万元	成灾模式
33	周家坪滑坡	滑坡	小型	不稳定	31	40	陡坡塌滑型
34	贺家滑坡	滑坡	中型	不稳定	33	220	沿基岩界面滑移型
35	梅子冲滑坡	滑坡	小型	不稳定	110	120	沿基岩界面滑移型
36	雷公坪滑坡	滑坡	小型	不稳定	30	75	陡坡塌滑型
37	红岩村 2 组滑坡	滑坡	小型	不稳定	27	180	浅表层滑动型
38	王家院子滑坡	滑坡	小型	不稳定	80	100	陡坡塌滑型
39	后村湾滑坡	滑坡	小型	不稳定	16	45	浅表层滑动型
40	向家冲滑坡	滑坡	小型	不稳定	67	120	沿基岩界面滑移型

3.2 监测设备选型

普适型监测以监测降雨和地表位移为主,主要包括降雨量、位移、裂缝、含水率、倾角、加速度等测项,本次监测工作选用了 GNSS 位移计、雨量计、裂缝计、含

水率计、倾角加速度计,这些设备的技术参数及技术特征见表 3 所示。研究区 40 处监测预警示范点共使用雨量计 40 台、GNSS 位移计 121 台、裂缝计 60 台、含水率计 10 台、倾角加速度计 3 台,共 234 台监测设备。

表 3 研究区滑坡监测设备实施表

Tab.3 Implementation of landslide monitoring equipment in the study area		
设备类型	技术参数	安装位置建议
雨量计	测量精度为±3% F.S; 分辨率不低于0.2 mm; 设备类型为压电式; 采样间隔0 s~24 h; 上传间隔0 s~72 h; 输出信号支持2G/4G 无线通讯,可定制 NB 窄带物联网、LoRa 或有线传输方式; 防护等级为 IP67; 供电方式为按需供电方式,满足连续 30 个阴雨天正常工作	布设于相对平坦且空旷区域,承雨器口至山顶的仰角不大于 30°,不宜布设在陡坡上、峡谷内、有遮挡或风口处
GNSS 位移计	输出信号: RS485、RS232; 静态解算精度平面不低于±2.5 mm+0.5 ppm,高程不低于±5.0 mm+0.5 ppm; 通讯为全网通+LoRa; 功耗在采样间隔不低于15 s 且上传间隔不低于15 s 情况下,接收机平均功耗≤2 W; 防水防尘为 IP67; 数据格式: 支持 RTCM32 原始数据及实时动态结果数据上传; 供电为 12~24 V 太阳能供电; 连续不间断运行时间(MTBF)不低于 32 000 h	布设于位移量较大、稳定性差的部位; 基准站需布设在滑坡外围稳定区; GNSS 监测点应位置空旷,在±15°高度截止角上空不能有成片障碍物,保证搜星条件良好,周围无高压线、变电站等电磁干扰源
裂缝计	测量范围为0~500 cm; 测量精度±0.1% F·S; 采样间隔为0~7 200 s; 上传间隔为1~36 000 s; 输出信号0~5 V,RS485; 通信方式为全网通+LoRa; 防护等级为 IP67; 供电方式为12~24 V 太阳能供电; 触发功能为设备具备阈值触发功能,如监测数据超过阈值,可立即采集监测数据并自动上报	布设于裂缝两侧,且应布设于裂缝较宽处。对宽度大于5 m 或两侧高差大于1 m 的裂缝,宜安装无线裂缝计
倾角加速度计	测量精度为倾角0.005°; 加速度1 mg; 振动1 Hz; 位移0.2% F.S; 量程为倾角±180°; 加速度±2 g; 振动0~2 000 Hz; 位移2 m; 采集方式为阈值触发加密采集; 通信方式为全网通/NB-Lot+LoRa; 供电方式为内置锂电(15 000 mAh)+外置太阳能板; 报警方式为微信、短信、语音; 防护等级为 IP67; 工作湿度95% RH; 工作温度-25℃~85℃	布设于坡顶危险岩土块体上或可能变形处及前缘存在鼓胀或滑塌区
含水率计	测量范围为干土-饱和土,测量深度不小于0.8 m; 测量精度为±4%; 采样间隔0 s~24 h; 上传间隔0 s~72 h; 支持双波段900/1 800 MHz; 支持 GPRS、CDMA、北斗数据发送方式; 具有定时自检功能,掉电数据保护、实时时钟校准; 输出参数为输出同位分层土壤含水率及土壤温度、倾斜角参数; 防护等级为 IP67; 在使用时含水率不需要标定校准,若需要标定的特殊土质,设备需要支持远程设置标定参数; 供电方式为采用太阳能浮充蓄电池供电方式	布设于滑坡的中腰部位、以及某些坪台或坑洼、地下水集中入渗点部位,深度以土岩接触带以上约1 m

3.3 监测数据采集与传输

本监测预警工作中: GNSS 位移计、含水率计的数据采集采用 5 s 采集一次,每小时 1 次数据回传的工作机制; 雨量计、倾角加速度计、裂缝计的数据采集采用增量触发工作机制; 监测设备统一采用 GPRS 全网通物联卡作为通信方式进行数据传输。监测数据发送到湖南省地质灾害防治信息平台,并同步推送至地质云地质灾害监测预警信息系统平台^[13]。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。

3.4 监测预警模型

目前,普适型监测预警判据分为单参数预警判据和多参数组合预警判据,单参数预警判据是针对主要变形特征与影响因素对滑坡监测时序大数据进行分析^[10,14],多参数组合预警判据是基于对滑坡孕灾、发灾、致灾等方面的系统认识,建立各项监测数据之间的关联性,形成多参数组合预警判据^[15-16]。本次监测预警采用单参数预警,测

项分为 GNSS、裂缝、雨量,各测项的预警判据表达式见表 4。

表 4 主要测项单参数预警判据表达式

Tab.4 Single parameter early warning criterion expression for the main test items		
测项	预警判据描述	预警判据表达式
GNSS	前 1 h 水平位移量或垂直位移量达到或超过阈值	$D_{1h} \geq G_h \vee D_{1v} \geq G_v$ 。(1)
		式中: D_{1h} 、 D_{1v} 分别为 1 h 内 GNSS 水平、垂直位移量,mm; G_h 、 G_v 分别为 GNSS 水平、垂直位移量的阈值,mm
裂缝	前 1 d 裂缝变形量达到或超过阈值	$d_1 \geq d_t$ 。(2)
		式中: d_1 为 1 d 裂缝变形量,mm; d_t 为裂缝变形量阈值,mm
雨量	前 1 h 雨量值达到或超过阈值、有效降雨量达到或超过阈值	$R_1 \geq R_t$ 。(3)
		式中: R_1 为 1 h 内降雨量,mm; R_t 为降雨量阈值,mm
		$R_e = \sum_{n=1}^N P_n \alpha^n \geq R_t$ 。(4)
		式中: R_e 为有效降雨量,mm; P_n 为前 n 天的降雨量,mm; R_t 为降雨量阈值,mm; α 为有效降雨系数; n 为天数,d

研究区内 40 处监测预警示范点均为土质滑坡,预警判据主要采用土质滑坡的判据。通过对区内滑坡形成时间与降雨资料的对比分析,发现滑坡变形与降雨关系密切,因此主要选取雨量和变形两个变量来进行预警模型参数的设置。

通过对溱浦县发生滑坡事件所对应的当日及前

期降雨数据分析,以滑坡事件对应的滑坡次数作为滑坡因子,采用 Pearson 模型,将滑坡发生当日降雨量定为 P_1 ,滑坡发生当日与前 1 日累计降雨量定为 P_2 ,依此递推,滑坡发生当日与前 9 日的累计降雨量定为 P_{10} ,对滑坡发生前的不同日数前期累计降雨量与滑坡因子的相关性进行分析,结果如表 5 所示。

表 5 不同日数前期累计降雨量与滑坡相关性分析

Tab.5 Correlation analysis between the accumulated rainfall with different antecedent rainfall days and the landslide										
不同日数前期累计降雨量	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
相关系数	0.597	0.605	0.646	0.589	0.539	0.518	0.497	0.486	0.445	0.424

由表 5 可知,不同日数前期累计降雨量与滑坡事件均为显著性相关,但相关性呈现先上升后下降的趋势,并在累计约 3 d(P_3)达到峰值,之后随前期降雨日数的增加,两者相关性系数逐渐下降。因而,可认为累计 3 d 降雨为本地区降雨诱发滑坡的

关键前期降雨日数。
统计各滑坡事件不同有效降雨系数 α ,所对应的累计前期 3 d 降雨量 R_3 与各滑坡事件的发生次数,利用 Pearson 模型进行相关性分析,结果如表 6 所示。

表 6 不同有效降雨系数累计前期 3 d 降雨量与滑坡相关性分析

Tab.6 Correlation analysis between the cumulative antecedent rainfall of three days with different effective rainfall coefficients and the landslide							
有效降雨系数 α	$\alpha = 1.0$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.4$
相关系数	0.636	0.641	0.704	0.656	0.563	0.547	0.539

由表 6 可知,有效降雨系数与滑坡事件之间都为显著相关,其中有效降雨系数 α 取 0.8 时相关系数最大,因此溱浦县的前期降雨系数 α 宜取 0.8,并依此对前期降雨进行折减。

雨量判据根据预警级别分别采用 1 h 降雨量、

3 d 有效降雨量指标进行综合判断^[17],雨量指标根据溱浦县地质灾害气象风险预警及上述有效降雨量数据分析结果来进行赋值。位移判据利用 GNSS 和裂缝监测数据,对滑坡稳定性进行判断^[18],研究区监测预警模型判据指标见表 7。

表 7 研究区滑坡监测预警模型表

Tab.7 Landslide monitoring and early warning model in the study area				
预警级别	蓝色	黄色	橙色	红色
雨量判据	前 1 h 雨量值 ≥ 20 mm	前 1 h 雨量值 ≥ 30 mm	前 0 ~ 24 h 雨量值 $\times 1 +$ 前 24 ~ 48 h 雨量值 $\times 0.8 +$ 前 48 ~ 72 h 雨量 $\times 0.6 \geq 80$ mm	前 0 ~ 24 h 雨量值 $\times 1 +$ 前 24 ~ 48 h 雨量值 $\times 0.8 +$ 前 48 ~ 72 h 雨量值 $\times 0.6 \geq 100$ mm

续表

预警级别	蓝色	黄色	橙色	红色
GNSS 判据	前 1 h 水平位移量≥50 mm 或前 1 h 垂直位移量 ≥ 50 mm	前 1 h 水平位移量 ≥ 100 mm 或前 1 h 垂直位移量 ≥100 mm	前 1 h 水平位移量 ≥150 mm 或前 1 h 垂直位移量≥150 mm	前 1 h 水平位移量 ≥200 mm 或前 1 h 垂直位移量 ≥200 mm
裂缝判据	前 1 d 裂缝变形量≥10 mm	前 1 d 裂缝变形量≥15 mm	前 1 d 裂缝变形量≥25 mm	前 1 d 裂缝变形量≥35 mm

4 监测预警运行

4.1 运行情况

设备安装及并网调试后,在地质云地质灾害监测预警信息系统平台上,完成预警判据和预警模型设置。平台能够不间断地对实时地质数据进行自动化分析。一旦监测数据触及或超过预设的预警阈值,系统将迅速启动预警机制,自动生成详尽的预警信息。随后,这些预警信息将通过手机短信的方式,实时、准确地发送给指定联系人,以确保相关人员能够迅速采取应对措施,有效防范和降低地质

灾害带来的风险。

2022 年度,监测系统运行情况良好,监测设备平均在线率为 95.66%,其中 GNSS 设备在线率为 92.56%,裂缝设备在线率为 96.92%,降雨量设备在线率为 94%,报警器设备在线率为 93.24%。均满足相关规范要求,可有效保障监测预警工作的正常运行。

4.2 预警响应

在研究区地质灾害机理分析、监测预警示范点建设与平台运行的基础上,通过预警阈值的设定、群测群防工作的经验,构建了区内滑坡地质灾害“人防+技防”的四级预警模型和预警响应措施(表 8)。

表 8 研究区滑坡监测预警模型及响应措施建议

Tab.8 Monitoring and early warning model and response measure suggestions for landslide in the study area

预警级别	人防预警	监测预警模型	响应管理措施建议
蓝色预警(注意)	初始变形 后缘裂缝断续产生,前缘鼓胀隆起等	雨量蓝色预警或裂缝蓝色预警或位移蓝色预警	正常监测,加强群测群防员巡查,加密观测频次;观测时间间隔 1 d/次;专业监测人员加强数据观测,每日不少于 2 次
黄色预警(警示)	匀速变形 后缘裂缝数量增多扩展局部有下错现象,前缘小规模崩塌等	雨量黄色预警或裂缝黄色预警或位移黄色预警	观测频次 12 h/次,提醒监测人员收集其他监测数据,加强监测数据校核;县级自然资源主管部门组织专家研判
橙色预警(警戒)	匀速变形—局部加速变形 后缘裂缝加深加宽,逐渐贯通,形成下错台坎,两侧出现剪切裂缝,滑坡边界清晰等	雨量橙色预警且裂缝橙色预警或位移橙色预警	观测频次 6 h/次;综合各类监测数据;地市级自然资源主管部门组织专家研判
红色预警(警报)	加速变形 后缘与两侧裂缝完全贯通,前缘大规模崩塌,有岩土体开裂或挤压巨响声等	雨量红色预警且裂缝红色预警或位移红色预警	启动应急预案,撤离和停止危险区内一切人类活动和工程活动;组织专家会商研判,报送上级自然资源主管部门

5 典型点分析

5.1 湾里滑坡概况

湾里滑坡位于湖南省怀化市溆浦县龙潭镇镇金塘村,为一土质滑坡,主滑方向为 150°,前缘高程为 350 m,后缘高程为 400 m,平面上呈舌形。滑坡体长 120 m,宽 200 m,平均厚 4 m,滑坡方量为 9.6 万 m³。1998 年 7 月滑坡首次发生下滑,中后缘形成明显拉张裂缝,弧形裂缝长约 80 m,宽 5 ~ 20 cm,走向 50°,前缘发生局部垮塌,垮塌方量为 100 m³。该滑坡体变形近几年未见明显变形迹象,但滑坡体后缘有一条长近 80 m 的裂缝,在连续强

降雨激发作用可能会再次启动,将直接危及坡体下方村民 12 户 43 人的生命及财产安全,潜在经济损失约 150 万元。

5.2 监测部署方案

该滑坡共布设监测设备 7 台,其中:布设雨量计 1 台,安装在滑坡左侧边界外围;布设裂缝计 2 台,安装在滑坡中后缘裂缝处;布设 GNSS 位移计 3 台(测站 2 处,基站 1 处),GNSS 位移计测站安装在滑坡主要变形区断面上,GNSS 位移计基站安装在滑坡左侧边界外围;布设声光报警器 1 台。监测该滑坡体的绝对位移、裂缝变形特征和区域降雨情况,实现对滑坡的变形及诱发因素的实时监控。具体监测设备见表 9,监测设备部署见图 3、图 4。

表 9 湾里滑坡监测设备

Tab.9 Monitoring equipment for Wanli landslide

设备类型	编号	布设位置	监测目的
GNSS 基站	GNSS-0	滑坡左侧边界外 50 m	基站
GNSS 测站	GNSS-1	滑坡中部	监测滑坡变形
GNSS 测站	GNSS-2	滑坡前部	监测滑坡变形
裂缝计	LF-1	滑坡后缘	裂缝变形监测
裂缝计	LF-2	滑坡后缘	裂缝变形监测
雨量计	YL	滑坡左侧边界外 50 m	降雨强度特征
声光报警器	SG	滑坡前缘	发布预警信息

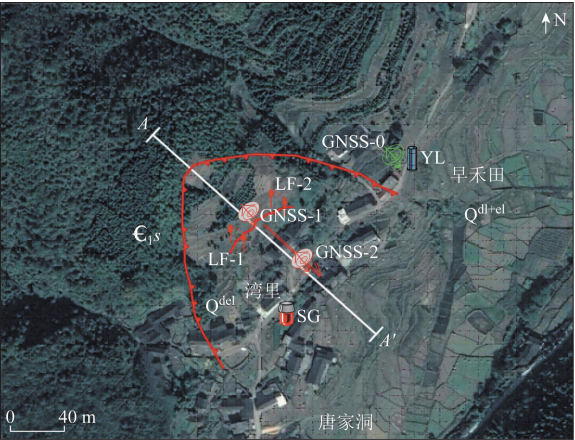


图 3 湾里滑坡监测预警平面布置

Fig.3 Monitoring and early warning layout of Wanli landslide

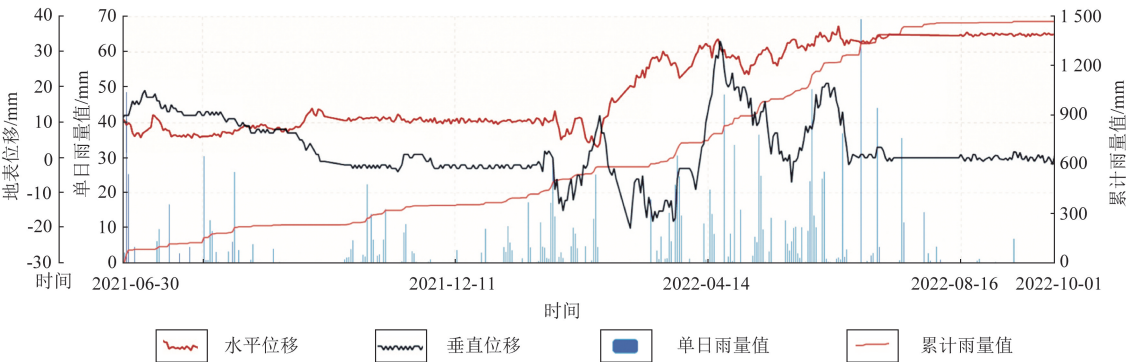


图 5 湾里滑坡 GNSS-1 位移降雨综合分析曲线(2021 年 7 月—2022 年 10 月)

Fig.5 GNSS-1 displacement rainfall comprehensive analysis curve for Wanli landslide (July 2021 - October 2022)

通过对监测数据的分析,结合现场的宏观变形特征,目前湾里滑坡处于初始蠕变阶段,滑坡变形与降雨量关系密切,后期监测中应对降雨和变形情

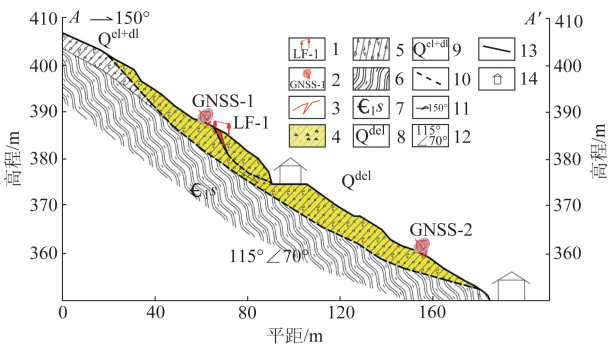


图 4 湾里滑坡监测设备部署 AA'剖面

Fig.4 Monitoring equipment deployment profile AA' of Wanli landslide

5.3 监测数据分析

本文选取了 2021 年 7 月至 2022 年 10 月的雨量计、GNSS 位移计监测数据进行分析。由图 5、图 6 可以看出,各测点滑坡累计合成位移波动式增大,最大变形发生时间相较于最强日降雨量发生时间呈现一定滞后特点,水平位移相较于累计合成位移,因其排除正负波动较大的垂直位移影响,与日降雨量相关性更加明显。GNSS-1 由于地处高位且临近裂缝,受“孔隙渗流 + 裂隙优势流”入渗模式影响,相比于地处低位且无裂缝的 GNSS-2,地表位移量更大,变形速率更高,与最大日降雨量响应更加显著。2022 年 8 月—2022 年 10 月区间少雨,变形速率骤减,各测点累计位移不再增加。

况保持高度警惕,根据雨情特征进行严密的监控,并实时分析滑坡的稳定性状况,以预防任何潜在的风险。



图 6 湾里滑坡 GNSS-2 位移降雨综合分析曲线(2021 年 7 月—2022 年 10 月)

Fig.6 GNSS-2 displacement rainfall comprehensive analysis curve for Wanli landslide (July 2021 - October 2022)

6 结论与建议

(1)溆浦县滑坡地质灾害发育,类型以土质滑坡为主,降雨是区内滑坡发生主要诱发因素。研究区土质滑坡的成灾模式主要有 3 种:沿基覆界面滑移型、浅表层滑动型、陡坡塌滑型。

(2)根据研究区滑坡地质灾害发育特征、成灾模式和致灾特点,选用雨量计、裂缝计、GNSS 位移计、含水率计、倾角加速度计共 234 台普适型设备对 40 处监测预警示范点开展监测,监测设备平均在线率为 95.66%,取得了良好的监测效果。

(3)采用 Pearson 模型对溆浦县发生滑坡事件所对应的当日至前 10 d 的逐日降雨数据进行分析,得到累计 3 d 降雨为区内降雨诱发滑坡的关键前期降雨日数,前期降雨系数 α 取 0.8。

(4)聚焦雨量和变形,通过对历史降雨数据和变形数据分析,提出了研究区雨量判据和变形判据,构建了研究区监测预警模型。通过对湾里滑坡监测数据分析,可实时掌握滑坡区降雨特征、滑坡的变形情况及两者的相关特性,实现滑坡预警。研究可为普适型监测预警工作的推广应用提供技术支撑,同时可有效指导相关部门开展应急响应工作。

(5)目前普适型监测预警存在异常报警过多、预警模型还不够完善等问题,尚需在下一步工作中进行深入研究及优化。建议进一步深入开展地质灾害成灾机理和监测预警综合分析,优化预警阈值和模型,开展数据评价和清洗,提高监测运行稳定性、监测数据可靠性和预警准确性。

参考文献 (References):

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(3):433-454.

[2] 铁永波,徐勇,张勇,等. 南方山地丘陵区地质灾害调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查,2020,7(2):1-12.
Tie Y B,Xu Y,Zhang Y,et al. Main progresses and achievements of geological hazards survey in hilly area of southern China[J]. Geological Survey of China,2020,7(2):1-12.

[3] Yin Y P,Wang H D,Gao Y L,et al. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town,the Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides,2010,7(3):339-349.

[4] 王青超,方美平,梁恩妙. 贵州龙家岩滑坡稳定性监测及防治方法分析[J]. 地基处理,2020,2(6):516-521.
Wang Q C,Fang M P,Liang E M. Stability monitoring and control methods of Longjiayan landslide in Guizhou province[J]. Chinese Journal of Ground Improvement,2020,2(6):516-521.

[5] Han B,Tong B,Yan J K,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,2018,2018:7391517.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报·信息科学

版,2019,44(7):957–966.

Xu Q,Dong X J,Li W L. Integrated space – air – ground early detection,monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(7):957–966.

[9] 王文涛. 倾斜航空摄影技术在茂密植被山区地质灾害调查中的应用[J]. 中国地质调查,2024,11(2):116–122.

Wang W T. Application of oblique aerial photography technology in the geological hazard investigation in dense vegetation mountainous areas [J]. Geological Survey of China, 2024, 11 (2): 116–122.

[10] 马娟,赵文祎,齐干,等. 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[J]. 西北地质,2021,54(3):259–269.

Ma J,Zhao W Y,Qi G,et al. Study on the multi – parameter early warning based on universal equipment:A case study of Kamenziwan landslide in the Three Gorges reservoir[J]. Northwestern Geology,2021,54(3):259–269.

[11] 王国卫,李明波,吴浪辉,等. 湖南省溆浦县 1/5 万地质灾害详细调查报告[R]. 怀化:湖南省地质环境监测总站,2014:51–53.

Wang G W,Li M B,Wu L H,et al. Detailed Geological Disaster Investigation Report at 1:50,000 Scale in Xupu County,Hunan Province[R]. Huaihua:Geological Environment Monitoring Station of Hunan Province,2014:51–53.

[12] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0460—2023 地质灾害自动化仪器监测预警规范[S]. 2023.

Ministry of Natural Resources,People’s Republic of China. DZ/T 0460—2023 Specification for Geological Hazard Monitoring and Early Warning by Automation Equipment[S]. 2023.

[13] 侯圣山,李昂,陈亮,等. 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[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):47–53.

Hou S S,Li A,Chen L,et al. Application of universal geo – hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province:A case study of Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2020,31(6):47–53.

[14] 张茂省,贾俊,王毅,牛干,等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设[J]. 西北地质,2019,52(2):103–116.

Zhang M S,Jia J,Wang Y,et al. Construction of geological disaster prevention and control system based on AI[J]. Northwestern Geology,2019,52(2):103–116.

[15] 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 J,Zhang M S,Feng L,et al. Critical characteristics of slip zone soil in loess landslide with flow failure pattern[J]. Northwestern Geology,2019,52(2):136–147.

[16] 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 Z,Peng J B,Chen W,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.

[17] 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.

[18] 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 landslide deformation[J]. Journal of Engineering Geology,2016,24(6):1041–1047.

Universal monitoring and early warning for landslide geological hazard:
A case study of Xupu County in Hunan Province

LIAN Zhipeng^{1,2}, CHEN Yu^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, LI Yining^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, TAN Jianmin^{1,2}

(1. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan Hubei 430205, China;
2. China Innovation Base for Geo – safety Risk Forecasting and Prevention Technology in Central South China, Geological Society of China, Wuhan Hubei 430205, China)

Abstract: In order to meet the application and promotion needs of universal geological disaster monitoring and early warning, the authors took the construction of 40 universal monitoring and early warning demonstration points for landslide hazard in Xupu County of Hunan Province as an example to introduce the entire process of the construction of universal monitoring and early warning demonstration points and the operation of the monitoring and early warning system. Forty monitoring and early warning demonstration points were selected according to the development characteristics, disaster modes, and disaster – causing features of landslide hazard in the study area. The universal equipment such as rain gauges, crack gauges, GNSS displacement meters, moisture meters, and inclination accelerometers were used for the professional detection of key indicators of monitoring and early warning

demonstration points, including deformation characteristics, influencing factors and slide precursor. For rainfall and deformation, Pearson model and monitoring data analysis method were adopted to propose rainfall criterion and deformation criterion in the study area. And the monitoring and early warning model was established. The monitoring data were aggregated to the system platform, and the criterion model automatically triggered warnings to send warning information. Wanli landslide was taken as a typical case to analyze the monitoring deployment plan and monitoring data. The rainfall characteristics, deformation features of the landslide, and their correlation were provided in real time, and the effectiveness and early warning capabilities of the universal monitoring equipment were preliminarily demonstrated. The research results could provide technical support for the promotion and application of universal monitoring and early warning work, and it could effectively guide relevant departments to carry out emergency response work at the same time.

Keywords: geological disaster; landslide; universal equipment; monitoring; early warning

(责任编辑：刘丹)