

水库地质灾害智能监控与预警系统研究及其工程应用

唐军峰¹, 唐佳¹, 钟平², 李代富², 刘福东²

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 2. 五凌电力有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 水利水电工程库区地质灾害具有数量多、分布零散而隐蔽、交通困难、人工监测不便等特点。为了克服以往人工监测方法的效率低、成本高、无法实时获取数据等条件的限制, 依托三板溪水电站库区地质灾害监测项目, 基于 GNSS、InSAR、先进的传感器、物联网和大数据等信息技术, 开发出水库地质灾害远程自动监测及预警系统。该系统既能够远程、实时显示重点边坡地质灾害点的多源异构数据、曲线和视频资料, 进行自动预警, 又能在线展示大面积流域的地表变形情况, 从中发现一些较为隐蔽的变形异常区域。该系统充分发挥了接触式监测和非接触式 (InSAR) 监测技术的优点, 实现了水库流域监测和重点边坡监测的结合, 为库区的地质灾害巡查指明了方向, 为地质灾害防控提供了技术支持, 并可以扩展到多领域的地质灾害监测。

关键词: 水库; 地质灾害; 远程自动监测系统; 预警

中图分类号: TU 457

Study of Intelligent Monitoring and Warning System for Reservoir Geological Disasters and Its Engineering Application

TANG Junfeng¹, TANG Jia¹, ZHONG Ping², LI Daifu², LIU Fudong

(1. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China;

2. Wuling Power Co., Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: The geological disaster at the reservoir of hydraulic & hydropower has the properties of large number, scattered and seclude distribution, difficult transportation and inconvenient artificial monitoring. To overcome the shortcoming of manual disaster monitoring such as inefficiency, high-cost and can't acquire real-time data, relies on the automatic monitoring projection at Sanbanxi hydropower station, based on the technologies of GNSS, InSAR, advanced sensors, IOT and big data, the geological disaster of remote automatic monitoring and warning system has been developed as showed in this paper. Not only the multi-source heterogeneous data, together with curves, video and automatic warnings at the geological disaster can be shown, but also the surface deformation with a wide range of the reservoir can be seen with this remote and real-time monitoring and warning system, from which we can find some secluded geological disasters places at the reservoir. This system combined both the advantages of contact monitoring and non-contact monitoring (such as InSAR), and also combined the watershed monitoring and the important slopes monitoring at hydropower station reservoir in this system, which not only show the direction, but also provide technical supports to the engineers who investigate the geological disasters at the reservoir area. This system can also be used in the other multi-domain geological investigations.

Key words: reservoir; geological disaster; remote automatic monitoring system; warning

0 引言

随着全球气候变化的加剧, 频繁发生的滑坡、泥石流等地质灾害已经成为制约人类经济发展、影响生存环境的主要因素之一。尤其是近年来, 随着我国国家能源战略布局和节能减排建设不断向西部推进, 大型水利水电工程建设因水库蓄水、库水位升降等原因诱发的库区滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害日益严重, 阻碍了水库正常运行, 对人们的生命财产构成威胁^[1-4]。

监测工作是地灾防治的重要手段,总体上,监测手段大致可以分为两类:一类是接触式监测,包括经纬仪、水准仪、测量机器人、GNSS、无线传感器等。此类方法具有测量精度高,误差小等特点,年形变误差可达毫米级甚至亚毫米级,GNSS和无线传感器甚至可以实现远程、实施、在线监测。但该方法需要在目标区域现场布设测点,且测点分布离散,具有空间盲区,无法全区域覆盖;另一类是非接触式监测,包括陆摄经纬仪、无人机、激光雷达、InSAR等,此类监测方法无需现场布置测点,可以远程、无接触地实现目标区域全覆盖、长时间和高精度的形变监测,但其观测过程是非连续的,且具有一定的时间周期。无论是接触式监测还是非接触式监测,均有其优点和不足,而将两者结合,取其各自优势无疑具有重要的工程意义^[5-7]。

三板溪水电站位于贵州省清水江中游河段,工程于2006年1月下闸蓄水,形成长达121km的库区干流和多条支流。水库库岸边坡自蓄水以来,已陆续发现有岸坡变形、地面开裂,甚至滑坡、坍岸和房屋地基沉降错动等地质灾害。到2016年底,三板溪库区共发现滑坡、塌岸、地面沉降等地质灾害200余处,零星分布,点多面广,其中东岭信滑坡堆积体、南埃大寨岸坡、展依寨岸坡和南包村岸坡等4个变形边坡因其在水库蓄水后出现变形,且边坡上部分布有村寨,一旦产生失稳则危害大,因而受到重点关注^[8]。为了识别三板溪水库地质灾害情况,实时掌握地质灾害的发生、发展和治理过程,开发了融合接触式监测(GNSS、地表裂缝、深部位移、地下水位、流量、库水位、降雨量和在线视频等)和非接触式监测(InSAR)等多项技术的远程、自动、实时地质灾害监测及预警系统,实现了流域观测与重点区域观测的结合,形成“天-地一体化”地灾监测体系,并可根据监测数据自动进行分级预警和信息发布,为防灾减灾提供决策支持。

1 地质灾害监测系统设计

研究工作依托三板溪水电站库区从清水江流域上游柳川镇至下游河口乡总长约60km的河段及其两侧的岸坡开展工作,工作内容主要分为三大部分:①对总长60km的水库河段两岸边坡开展星载合成孔径雷达(InSAR)监测,研究其地表变形情况,识别出潜在的地质灾害隐患点和已有地质灾害隐患点的变形规律;②对区间内重点地灾隐患边坡(东岭信滑坡堆积体、南埃大寨岸坡、展依寨岸坡和南包村岸坡)开展GNSS地表位移、地下水位、排水洞洞内流量、降雨量、地表裂缝、深部位移和视频等项目的监测监控,实时获取有关信息;③依据上述监测成果,开发出水库地质灾害的智能监控及预警系统。

1.1 监测系统架构与功能

水库地质灾害系统的软件体系结构采用以数据库为技术核心、GIS为支持的、应用B/S与C/S相结合的模式,即在系统软件和支撑软件的基础上,基于采集的数据,建立了应用软件/信息处理/预警分析/信息发布等多层结构,不同的服务层具有不同的应用特点。系统总体架构见图1所示。

系统主要的功能模块包括:三维地理信息子系统、地质灾害自动监测子系统、InSAR监测子系统、数据应用子系统、预警分析子系统、决策支持子系统等多个子系统,实现的主要功能包括:

(1) 构建基于DEM的水库库区三维基础信息平台,实现基础空间信息的检索查询和基本GIS分析功能,并可加载展示局部区域的三维无人机摄影数据成果;

(2) 接收和管理通过GPRS/4G传输到数据库的多源异构实时监测数据、视频资料,实现地质灾害多源异构监测数据实时自动集成,可进行数据查询、对比和分析;

(3) 对InSAR监测数据的处理和三维图形加载、查询和展示;

(4) 实现对地质灾害多源异构监测数据实时自动处理,支持监测数据、报警数据、操作数据、统计、分析、对比、输出和打印;

(5) 实现对预警阈值的设置、自动分析、判断,通过通信网络自动发出对应级别的预

警信息，并根据设定，给出相应的处置建议信息。

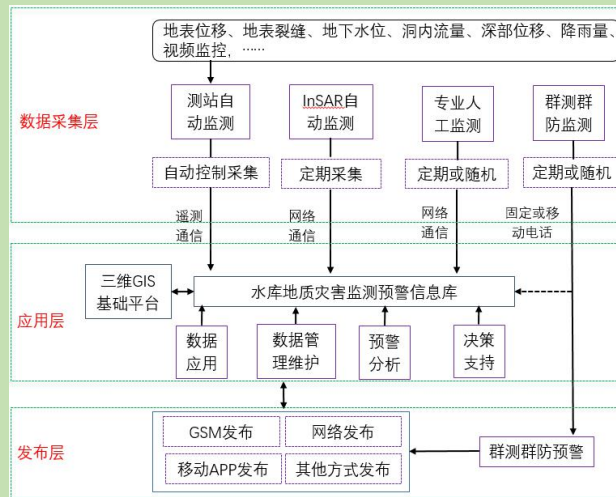


图 1 系统总体架构

1.2 数据采集与接收

(1) 数据采集

研究工作对 4 个重点地质灾害隐患边坡（东岭信滑坡堆积体、南埃大寨岸坡、展依寨岸坡和南包村岸坡）开展 GNSS 地表位移、地下水位、洞内流量、降雨量、地表裂缝、深部位移和视频等项目的监测监控，采用了多种类型的传感器，其类型和数量见表 1 所示。

表 1 接触式自动化监测数据采集设备

站点名称	地表位移	深部位移	地表裂缝	地下水位	洞内流量	降雨量	视频
传感器类型	GNSS	固定式测斜仪	自动裂缝计	地下水位计	磁致水位计	翻斗式雨量计	激光高清夜视摄像头
传感器(设备)							
数量(套)	21	52	4	9	4	1	4



(a) 地表位移站



(b) 地下水位站



(c) 雨量站

图 2 地质灾害自动化监测站

本项目在三板溪库区共布置了各类监测站 48 个（其中，东岭信 24 个、南埃大寨 10 个、展依寨 9 个，南包村 5 个），典型照片见图 2 所示。每个监测站采用完全的点对点传输方式，即每套监测设备之间都是相互独立，互不干涉。现场设备除了视频监测站采用光纤宽带传输

信号和市电供电以外，其余测站均采用无线传输、太阳能电池板供电；监测数据可以发给多个监控主机（一卡多发），实现监测数据的互为备份，保证数据的安全。

(2) 数据接收

本项目监控中心有两处，分别位于长沙五凌电力大坝安全监测中心和贵州三板溪水电站厂房，每个监控中心均由地质灾害数据接收处理系统、数据库系统、计算机网络系统、地质灾害预报及服务系统等四部分组成。

其中：①数据接收处理系统主要完成系统各测站地质灾害信息的实时接收、处理和入库，并提供测站信息查询服务；②数据库系统主要为系统维护管理、信息查询与服务、地质灾害预报等提供数据；③计算机网络系统主要为系统数据接收、处理、查询以及信息隔离传输、地质灾害预报服务等提供软硬件支撑；④地质灾害预报与服务系统主要根据监测区域地质灾害预报模型进行地质灾害预报作业，并提供预报成果发布服务。

监控中心的网络环境是三板溪水电站库区地质灾害监测预警系统运行的基础，其网络结构见图 3 所示；基本的硬件配置包括数据库服务器、数据接收计算机、工作站等计算机设备，以及交换机、路由器等网络通信设备（图 4）。

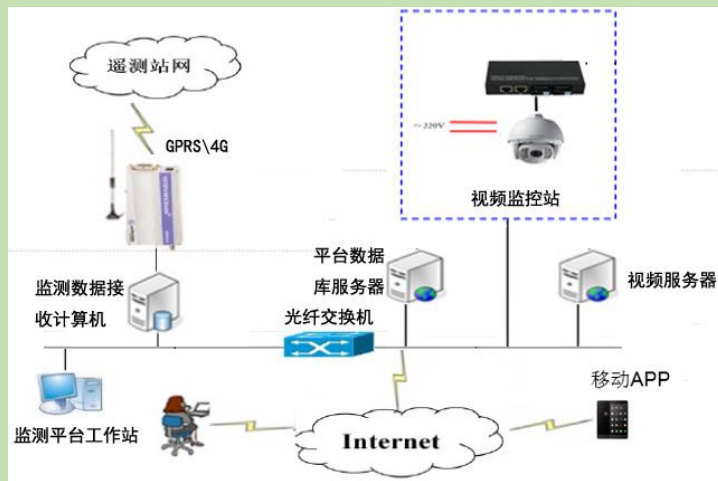


图 3 监控中心网络结构图



图 4 监控中心设备

1.3 数据通信

数据采集终端自动根据设定的周期，快速读取各传感器的数据，按控制条件进行数据发送。发送数据时，自动将监测数据组成 IP 数据包，通过 GPRS/4G 模块将数据发送远程监控中心，由监控中心的数据接收服务器接收、数据解码、信息处理，再存入数据库。

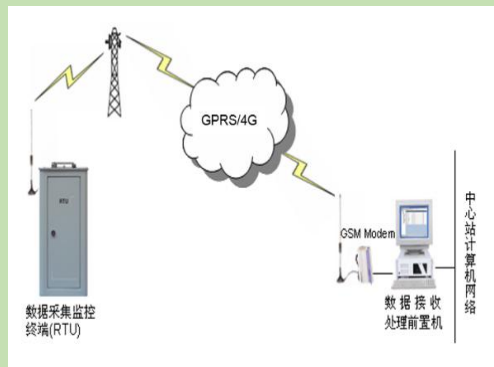


图 5 GPRS/4G 通信网络拓扑结构及设备配置图



图 6 通信传输组网示意图

在本系统中，数据通信采用点对多的工作模式（一卡双发），即监测数据被同时发送至两个中心站，中心站收到信息后，对遥测站发送相应的确认信息，遥测站将根据不同的确认

信息，自动转入休眠或重新发送数据的状态。现场视频监控站数据传输采用光纤宽带网络的通信方式。

图 5 和图 6 分别给出了本系统的 GPRS/4G 通信网络拓扑结构及设备配置和通信传输组网图。

1.4 卫星 InSAR 监测方案

作为主动遥感测量技术解决方案，InSAR 技术能够在各种天时和天候条件下，在不受极端天气情况和日光照射条件的情况的影响下，可对大面积目标区域进行固定频率的毫米级精确监测测量，成果为高密度三维形变测量点阵，能够较完整覆盖目标区域并反应整个区域的形变过程空间关系（图 7）。

本次研究采用德国的 TerraSAR-X 系列雷达卫星作为变形监测的数据源，雷达波段 X，最高分辨率 0.25m，StripMap 成像模式，地面分辨率 3m×3m，极化方式 HH，卫星数据获取周期 11 天，轨道精度 5cm。监测工作分两个阶段进行，第一阶段：采用差分合成孔径雷达干涉分析（以下简称 DInSAR）技术对高分辨率的雷达卫星数据进行形变计算，解译由于地表变形造成的形变位置，圈定空间维度的形变区域，同时对解译结果进行初步分析；第二阶段：基于前期的差分干涉初步结果，采用时间序列永久散射体合成孔径雷达干涉分析（简称 PSInSAR）技术，获取长时间序列的地表形变图，不仅在空间维度掌握形变区域，同时在时间维度上了解变形的发展过程。监测时间从 2018 年 12 月至 2019 年 12 月。

卫星监测示意图 8 所示。

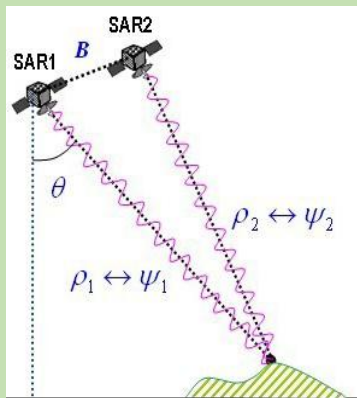


图 7 InSAR 监测原理

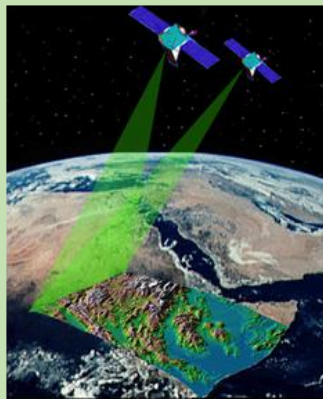


图 8 卫星监测示意图

2 平台开发与预警初步设置研究

2.1 水库地质灾害智能监控及预警平台开发

系统平台应用 B/S 与 C/S 相结合模式，通过地质灾害自动监测站实现地表位移、深部位移、地表裂缝、地下水位、洞内流量、视频等地质灾害信息的收集管理，建立地质灾害数据、报表、图像等信息数据库，提供数据管理以及信息发布服务等基本应用功能，并与相关高级应用功能如报表图表管理、信息发布及预警等多个功能模块无缝连接，为规范管理地质灾害监测提供技术支撑。

系统平台登录后首先显示的是“值班界面”（图 9），该界面包括天气信息、预警发布信息、测站分类与状态信息、视频监控显示、三维地图、流域梯度信息等，其中的流域梯度可以查询包含三板溪、挂治、白市等多个沅水流域上的水电站的监测情况信息。

另外系统平台（图 9 中）还包含了卫星监测、监测数据、监测曲线、监测报表、预警信息、系统管理、注销等多个模块界面，提供了监测点空间信息查询、卫星监测成果展示、监测数据查询、监测曲线图自动生成与展示、监测报表自动生成与下载、预警阈值的设置与发

布、系统基础数据管理等服务。

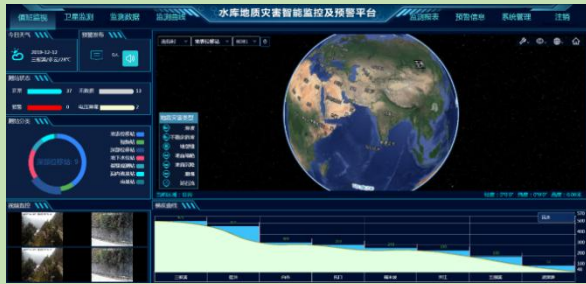


图9 登录后的平台首页

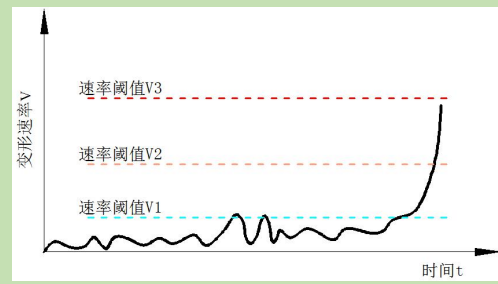


图10 变形曲线速率阈值设置

2.2 预警设置初步研究

目前，基于地表变形监测的滑坡预警模型已取得了不少研究成果^[9-10]，其关键在于根据滑坡体的变形特征采用合适的监测设备和监测方法，并建立使用的预警模型。根据三板溪库区4个主要地质灾害点边坡的变形特点，本次研究工作主要采用变形速率预警判据进行预警，同时采用位移切线角预警判据进行滑坡辅助预警。

(1) 变形速率预警判据

根据当前三板溪库区地质灾害点的变形监测资料，各测点具有一个普遍现象：实际变形过程中由于匀速变形阶段滑坡变形速率仍然会产生一定程度的波动，为了进一步区分不同的外界因素影响或者偶然变形速率加快对变形的响应，同时为了匹配四级预警机制，本项目采用多级速率阈值 $V1 < V2 < V3$ 判断滑坡的变形速率，通过多级变形速率阈值判断滑坡的变形情况并采取不同的措施，建立速率阈值预警模型（图10）。

多级速率阈值 $V1 < V2 < V3$ 的确定需要针对三板溪库区各个地质灾害点的变形特征设定。其中， $V1$ 主要识别滑坡开始出现异常变形时的状态， $V2$ 判断滑坡异常变形是否进入较快的程度， $V3$ 判断变形是否超过了一般新增裂缝等导致的滑坡短时快速变形（图10）。

综合分析已有的监测数据，参考相关资料，速率阈值设置规则暂定如下：

$$V1=3V$$

$$V2=10V$$

$$V3=20V$$

式中： $V1$ 、 $V2$ 和 $V3$ 分别对应相应级别的速率阈值（图10）； V 为某一测站监测曲线中的均匀变形速率。理论上，每个变形测站分别配置不同变形速率 V 。

(2) 其它预警值的设置

位移切线角预警也是当前预警研究的重要研究方向，经分析研究，本项目的位移切线角预警判别如下：

初加速阶段： $45^\circ < \text{切线角} < 80^\circ$ ；

匀加速阶段： $80^\circ \leq \text{切线角} < 85^\circ$ ；

临滑阶段： $\text{切线角} \geq 85^\circ$ ；

下滑前： $\text{切线角} \approx 89^\circ$ 。

3 系统在三板溪库区地质灾害监测中的应用

本项目的监测工作从2018年12月份开始，距今已有1年多的数据积累，成果包括接触式自动化数据成果以及非接触式卫星 InSAR 成果，具体如下：

3.1 自动化监测成果

图11给出了多种典型监测曲线以及视频，其中，多个监测曲线的关系可以通过开关键自由打开或者关闭，以便进行数据比对和相关性综合分析。以图11(a)为例，该图同时展示了东岭信测点 DDB1 的变形曲线、降雨量（柱状图）和库水位历时曲线，由图可知：2019

年 4 月，降雨量开始增多，标志着水库汛期开始，此时的水库库水位由低谷时的 435m 左右开始升高，测点 DDB1 的变形曲线也开始迅速抬高；到 2019 年 7 月底，降雨量开始减少，此时的库水位达到峰值 472m，测点 DDB1 的变形曲线也达到一个相对高点，随后处于缓慢增长状态。通过该图的分析，可以认为边坡该点的变形与降雨量、库水位等因素关系密切。其余监测曲线图也可得出类似的结论。

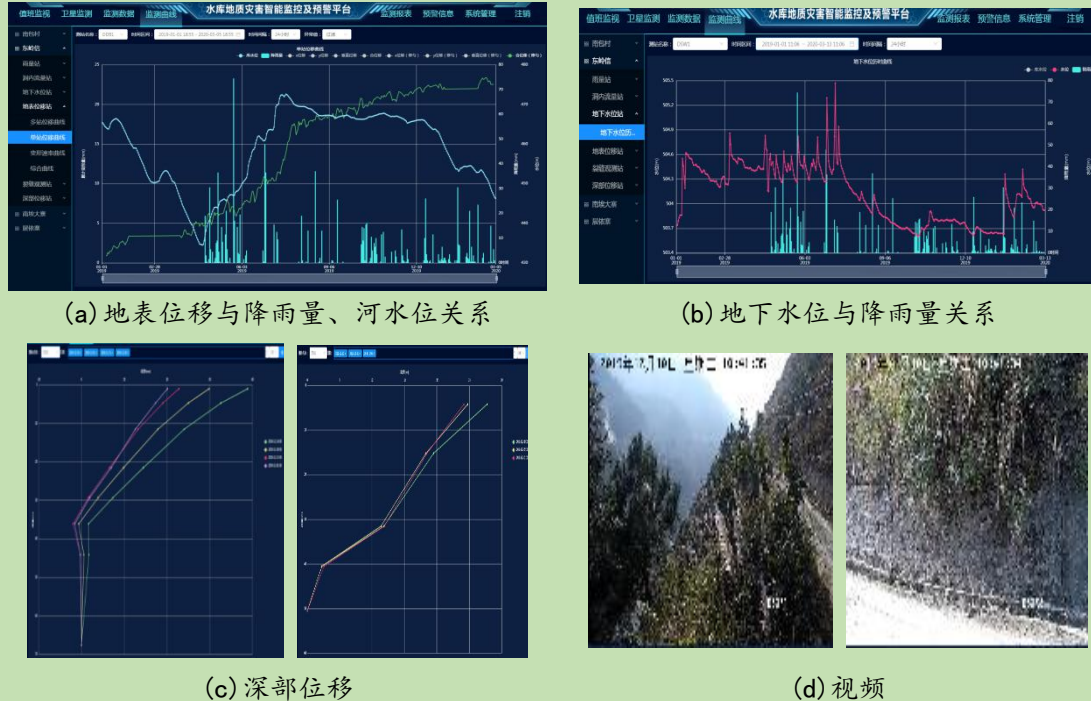


图 11 平台展示的监测成果

系统平台还可以自动生成地质灾害监测成果的简报、周报、月报等监测报表，操作人员可方便地下载监测期任意时间段的报表。下载的报表格式包括 pdf 和 word 两种文档，可作为监测成果直接报送有关人员，或可自行编辑和分析。图 12 为三板溪水电站库区地质灾害自动化监测月报的自动生成和下载功能展示。

系统平台可远程、动态展示三板溪库区 4 个重点边坡共 48 个监测站点的降雨量、排水洞流量、地下水水位、地表位移、裂缝、深部位移、库水位、视频等多种信息，可提供曲线、数据、报表等资料的查询、展示、下载等多项功能。



3.2 卫星 (InSAR) 监测成果

(1) 水库库岸大范围变形特征

系统平台融合了星载 InSAR 监测成果，并将其作为单独的模块，方便调用。

本次研究选取三板溪库区柳川镇~河口乡总长约 60km 的河段，采用星载 InSAR 对该河段及其两侧岸坡开展监测，获得了近 1 年来的升轨和降轨数据各 26 景 (共 52 景)，每一景

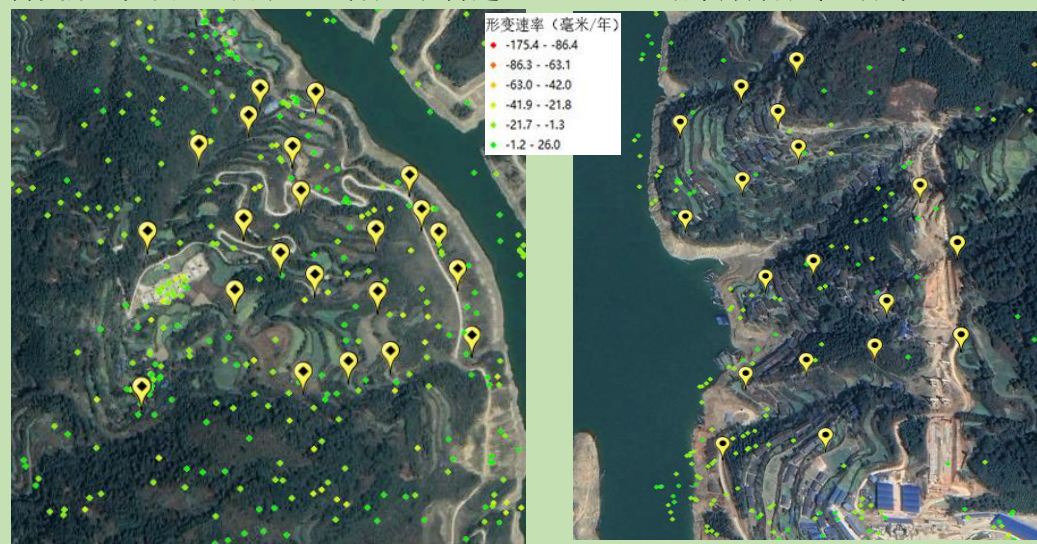
均有 6 万多个监测点。图 13 为系统展示的三板溪库区大范围的 InSAR 监测成果。图中，每个测点的颜色深浅分别代表不同的沉降变形值，色谱范围从深蓝到深红，深红为沉降最大，深蓝为抬升最大。

通过鼠标点击任意监测测点，即可获得该点的变形历时曲线和相关信息，如图 13 右下角所示。由图中曲线可知，该测点从 2019 年 6 月份开始变形持续增大，至 2019 年底，沉降变形量为 60mm。



图 13 三板溪水电站库区地质灾害 InSAR 监测成果

由图 13 还可以看出，总体上，监测期内三板溪水电站库区岸坡变形不大，一般在 30mm 之内，重点关注的 4 个边坡的变形也均在 30mm 以内，见图 14 所示（限于篇幅，图 14 仅给出了其中的两个边坡），与 GNSS 监测结果基本一致；部分河段两侧岸坡出现了较大的沉降变形（见图 13 中的红色部分，沉降超过 100mm），沿水库库岸零星分布。



(a) 东岭信滑坡堆积体

(b) 南埃大寨岸坡

图 14 典型岸坡 InSAR 监测成果

(图中水滴图案为卫星角反射器)

(b) 局部区域异常变形特征

根据图 13 的监测成果，三板溪水电站库局部河段出现了变形较大的异常区域，且分布

散乱而隐蔽。图 15 为放大后的部分异常变形区域位置和变形范围，由图可知，在观测期内，这些区域地表出现了超过 100mm 的区域性沉降变形，其中，图 15 (a) 位于南埃大寨上游，据现场调查，该处因高速公路施工导致地表变形增大，属于人为因素导致的异常；现场调查显示，图 15 (b) 和图 15 (c) 两处大变形区域均未发现人为因素影响，其中的图 15 (c) 还是村寨所在地。因此，类似 15 (c) 的变形异常区域需引起高度关注，也是后续库区的地质灾害巡查和防控工作重点。

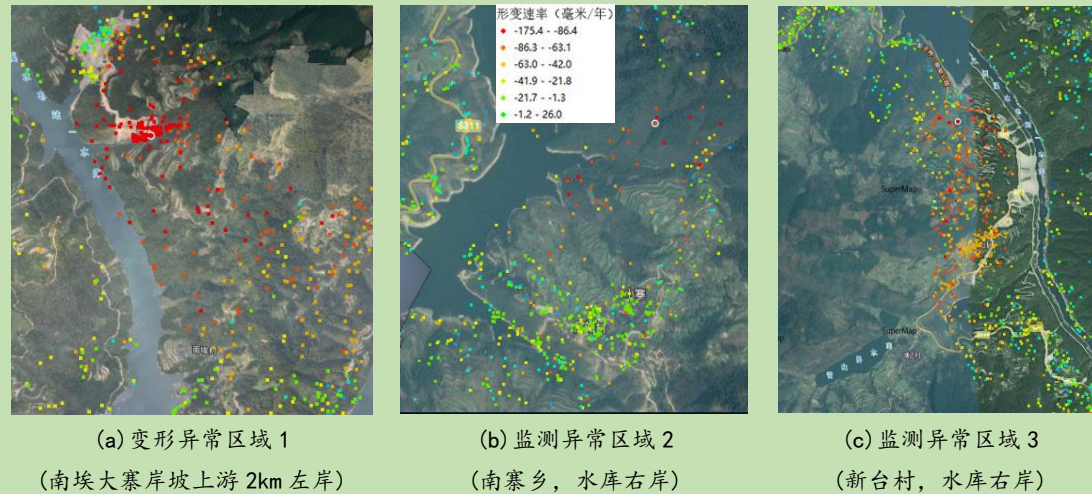


图 15 卫星 InSAR 监测异常区域

3.3 系统预警

水库地质灾害远程监测及预警系统包含有预警信息模块，可进行预警阈值的设置并发出告警信息。本次主要考虑采用变形速率预警判据和位移切线角预警判据来进行联合、分级预警，预警信息通过在系统平台自动弹出、配以语音信息，并自动发送给相关人员。

图 16 为系统监测得到的典型变形速率曲线及其设置的分级预警线，其中，分级预警阈值可以在系统平台的“预警信息”模块进行手动设置，且不同监测点可以单独设置预警阈值。当监测值达到设定的预警阈值后，系统自动向用户的电脑端、手机客户端发出相应级别的预警信息，图 17 即为发送至手机端的预警信息样例。

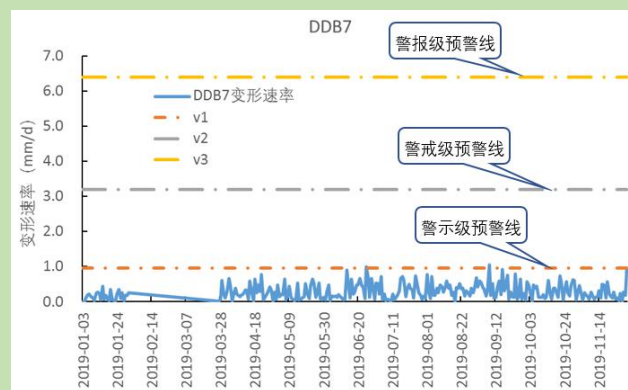


图 16 典型的变形速率曲线及其分级预警线



图 17 预警信息自动发送至手机端

4 结论

(1) 水库地质灾害远程监测及预警系统融合了星载 InSAR+GNSS+深部位移+地下水位+流量+视频等多项技术，实现了“天-地一体化”远程、自动、全天候监测和预警。平台可以实时分析、处理监测数据，展示图表，可以自动生成、下载监测报表，实现了数据处理分析

的自动化、智能化。

(2) 对三板溪水电站库区 4 个重点地质灾害边坡开展了远程、实时、全天候监测, 获得了变形规律; 采用星载 InSAR 技术获得了水库流域的地表变形特征, 可以在平台上方便、直观地查询和展示变形过程, 可以发现一些较为隐蔽的变形异常区域, 为库区的地质灾害巡查和防控工作指明了方向。

(3) 针对不同地质灾害点, 甚至同一边坡的不同位置测站, 设置了不同的监测预警阈值, 并能自动发出告警信息, 可以为同类工程提供有益参考。

(4) 开发的地质灾害智能监控及预警平台通过功能扩展, 可以应用到多个水库流域, 以及多行业、多领域的地质灾害自动化监测, 为地灾防治工作提供了技术保障。

参考文献:

- [1] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6):1081-1090
- [2] 甘露,袁润,贾伟.基于多源数据的公路边坡稳定远程实时监测系统设计[J].武汉工程大学学报,2015,37(12):31-34
- [3] 钟佳迅. 山区洪水远程监测预警系统研制[D].成都:成都理工大学, 2013
- [4] 高银铃.三峡地质灾害对工程的影响及应对[J].中国水运月刊, 2013, 13(8):174-174
- [5] 何满潮, 韩雪, 张斌, 等.滑坡地质灾害远程实时监测预报技术与工程应用[J].黑龙江科技大学学报, 012,22(4):337-342
- [6] 关凤峻, 沈伟志.全国地质灾害灾情分析与防治研究[J].水文地质工程地质, 2016,43(2):1-4.
- [7] 王卓妮. USGS 滑坡研究和服务进展及启示[J].气象科技进展, 2013,3(增刊): 62-69.
- [8] 唐军峰,唐雪梅,曾向农,等.蓄水后库岸堆积体边坡变形特征及其稳定性分析[J].吉林大学学报(地球科学版), 2018,48(5):1546-1555
- [9] 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
- [10] 李秀珍, 许强, 黄润秋, 等. 滑坡预报判据研究[J].中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4):5-11

第一作者简介:

唐军峰(1977-), 男, 湖南东安人, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土力学方面的研究工作。

联系方式: E-mail: 184683801@qq.com

Tel: 13308415790