

三峡库区滑坡专业监测技术方法适宜性分析与建议

周红, 黄海峰, 张瑞, 易庆林, 易武, 张国栋, 卢书强, 董志鸿, 柳青

Suitability analysis and recommendations for professional monitoring techniques and methods of landslides in the Three Gorges Reservoir: A case study of the Zigui section in Hubei Province

ZHOU Hong, HUANG Haifeng, ZHANG Rui, YI Qinglin, YI Wu, ZHANG Guodong, LU Shuqiang, DONG Zhihong, and LIU Qing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202404023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地质灾害监测复杂场景下压电式雨量计精度标定及适宜性分析

Precision calibration and suitability analysis of piezoelectric rain gauges for complex scenarios in geological hazard monitoring

马娟, 张鸣之, 齐干, 叶思卿, 黄丁帆 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 91-96

三峡库区石榴树包滑坡近期变形特征与机理分析

Recent deformation characteristics and mechanism of the Shiliushubao landslide in the Three Gorges Reservoir Area

杨何, 汤明高, 许强, 龚正峰, 祝权 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 67-74

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

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

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

自贡市地质灾害专群结合监测预警模式升级与实践

Upgrading and practice of early warning mode of geological disaster special group combination in Zigong City

杨江涛, 李波, 李伯宣, 罗兰 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 130-134

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202404023

周红, 黄海峰, 张瑞, 等. 三峡库区滑坡专业监测技术方法适宜性分析与建议——以湖北秭归段为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 97-110.

ZHOU Hong, HUANG Haifeng, ZHANG Rui, et al. Suitability analysis and recommendations for professional monitoring techniques and methods of landslides in the Three Gorges Reservoir: A case study of the Zigui section in Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 97-110.

三峡库区滑坡专业监测技术方法适宜性分析与建议 ——以湖北秭归段为例

周 红^{1,2}, 黄海峰^{1,2,3}, 张 瑞^{1,2}, 易庆林^{1,2}, 易 武^{1,2}, 张国栋^{1,2}, 卢书强^{1,2}, 董志鸿⁴, 柳 青⁴

(1. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学湖北省水电工程智能视觉监测重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 4. 宜昌市地质环境监测站, 湖北 宜昌 443002)

摘要:三峡库区是我国最早系统性地实施滑坡等地质灾害专业监测的区域之一, 从 2003 年三峡水库蓄水至今 20a, 三峡库区秭归段内已有超过 200 处滑坡灾害实施了专业监测预警, 监测技术方法涵盖了早期的人工监测到近年来的实时自动化监测。文章在介绍三峡库区秭归段内现有地质灾害专业监测技术方法概况基础上, 针对以滑坡为主的不同专业监测技术方法进行了系统总结和适宜性分析, 并根据斜坡变形阶段和不同变形特征提出了针对性专业监测技术方法选择建议。结果表明: 无论是针对斜坡变形阶段还是不同变形特征, GNSS 自动地表位移结合自动降雨量监测均是首选技术, 然后应根据具体需求和灾害体实际情况, 适当增加其他监测技术。研究成果可为更好地优化实施库区后续地质灾害监测提供一定参考。

关键词: 三峡库区; 滑坡; 专业监测; 形变; 预警; 适宜性分析

中图分类号: P692.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)04-0097-14

Suitability analysis and recommendations for professional monitoring techniques and methods of landslides in the Three Gorges Reservoir: A case study of the Zigui section in Hubei Province

ZHOU Hong^{1,2}, HUANG Haifeng^{1,2,3}, ZHANG Rui^{1,2}, YI Qinglin^{1,2}, YI Wu^{1,2}, ZHANG Guodong^{1,2}, LU Shuqiang^{1,2}, DONG Zhihong⁴, LIU Qing⁴

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Hubei Key Laboratory of Intelligent Vision Based Monitoring for Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 4. Yichang Geological Environment Monitoring Station, Yichang, Hubei 443002, China)

收稿日期: 2024-04-12; 修订日期: 2024-05-25

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A2031; 42007237; 42107489); 水电工程智能视觉监测湖北省重点实验室开放基金项目(2020SDSJ02); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目(2020KDZ09)

第一作者: 周 红(1999—), 女, 云南屏边人, 地质工程专业, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害识别和监测。E-mail: zhh0225@qq.com

通讯作者: 黄海峰(1978—), 男, 湖北宜昌人, 人文地理学专业, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害识别与监测方面的科研与教学工作。E-mail: hhf@ctgu.edu.cn

Abstract: The Three Gorges Reservoir area is one of the earliest regions in China to systematically implement professional monitoring and early warning for geological disasters such as landslides. Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir in 2003, nearly 300 instances of landslide disasters have been recorded in the Zigui section of the Three Gorges Reservoir over the past 20 years. Monitoring techniques have evolved from early manual monitoring to real-time automated monitoring in recent years. Based on an overview of the existing professional monitoring techniques and methods for geological disasters in the Zigui section, this paper systematically summarizes and analyzes the suitability of different professional monitoring techniques and methods. Additionally, it provides recommendations for selecting appropriate professional monitoring techniques based on the stages of slope deformation and various deformation characteristics. The findings reveal that GNSS automated surface displacement monitoring with automated rainfall monitoring is the preferred technology, regardless of the slope deformation stage or the distinct deformation features. Other monitoring technologies should be added as needed based on specific requirements and the actual conditions of the disaster site. The research findings provide valuable references for optimizing the implementation of future geological disaster monitoring and early warning in the reservoir area.

Keywords: Three Gorges reservoir; landslide; professional monitoring; deformation; early warning; suitability analysis

0 引言

滑坡监测是指对滑坡体的变形运动过程和触发因素进行的持续测量和解释,以获得其动态变化的客观真实记录^[1-3],从而为实施滑坡预警、达到防灾减灾目的提供重要技术支撑和决策依据。

三峡库区是我国最早系统性地实施滑坡等地质灾害专业监测预警的区域之一。为保障三峡库区试验性蓄水安全,2001 年之前,首次将 GPS 技术引入库区地质灾害监测预警开展试验研究^[4-6]。然后于 2001 年开始启动地质灾害监测预警工程建设^[7-10],并于 2003 年首次试验性蓄水前初步建立起了三峡库区地质灾害专业监测预警网络体系,从此正式进入区域性、规模性的集中监测运行阶段^[11-12]。之后,又分别在 2007 年和 2016 年对该监测预警网络体系进行了扩充完善和优化升级^[12-14]。2018 年,湖北省和宜昌市开始实施地质灾害综合防治体系建设^[15],其中一项重要任务就是推广普适型监测预警技术方法,经过连续几年建设,目前也已构建起系统的群专结合专业监测预警网络体系。截至 2023 年,在三峡水库蓄水至今 20 a 之际,三峡库区秭归段内已有超过 200 处的滑坡灾害实施了专业监测预警。

毫无疑问,地质灾害专业监测预警工程为保障三峡工程及库区人民生命财产安全发挥了不可替代的重要作用,监测预警也被公认为防治大量滑坡灾害最实际有效的手段之一^[16-20]。然而,适宜的滑坡专业监测技术方法一定是与滑坡的变形特征和演化阶段相对应的,如何针对滑坡灾害的不同变形阶段和特征,精准选择与之相匹配的监测技术,成为提升监测预警效能的关键。

20 a 来,随着科学技术的进步,三峡库区的地质灾害专业监测技术方法,也经历了早期以人工、单一的地表变形监测为主,近期升级为以变形加上主要诱因的综合自动化监测为主,不同监测技术方法各有优势利弊。鉴于此,本文在系统分析总结三峡库区秭归段以滑坡为主要对象的地质灾害监测技术方法适宜性的基础上,根据斜坡变形阶段和不同变形特征提出针对性优化建议,为更好地实施库区地质灾害监测预警提供参考。

1 三峡库区秭归段地质灾害专业监测概况

自 2003 年三峡水库首次蓄水以来,在十余家专业队伍的共同努力下,通过二期、三期以及后续规划阶段的地质灾害监测预警工程建设和运行,三峡库区已经构建起了集专业监测、群测群防和信息系统为一体的地质灾害监测预警网络^[12]。2018 年以前,研究区共运行 50 余处专业监测预警,2018—2023 年 5 月,在湖北省和宜昌市地质灾害综合防治体系建设支持下,研究区内又完成了 200 余处群专结合专业监测预警工程的建设。即目前在研究区内共有 250 余处地质灾害实施了专业监测预警(图 1)。以下是对这些灾害体已有的专业监测技术方法的分析总结。

2 主要专业监测技术方法手段

随着滑坡监测技术的发展,三峡库区滑坡监测方法逐渐由人工方法转变为自动化智能监测^[19-22]。近年来,随着普适性仪器的推广^[23],以自动、变形加上主要诱因的综合监测越来越受到大众的欢迎。滑坡变形监测技术可分为地表监测和深部监测 2 类^[24-26]。地表变形监测动态测量滑体表面某个测点相对稳定参照物的三

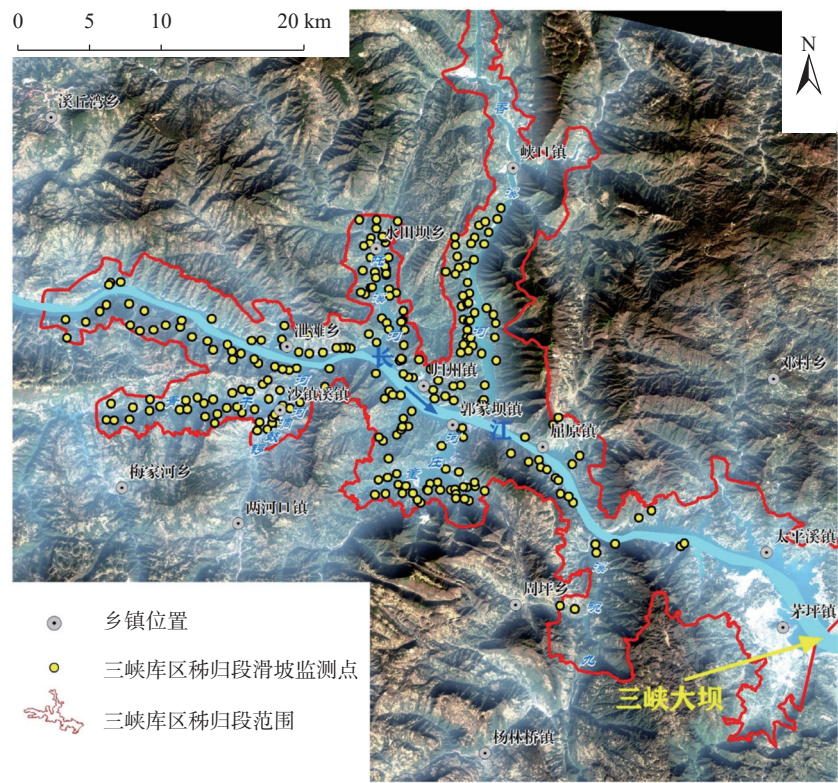


图 1 三峡库区秭归段地质灾害专业监测点分布图

Fig. 1 Distribution map of specialized geological disaster monitoring points in the Zigui section of the Three Gorges Reservoir area

维位移量、位移方向、位移速率等位移量^[21, 27], 如 GNSS 人工地表位移测量、GNSS 自动地表位移测量和自动地表裂缝监测等; 深部变形监测主要测量滑坡体地面以下的水平位移^[28], 如人工深部测斜和自动深部测斜监测。

目前, 区内主要有从 2003 年开始实施的三峡库区

地质灾害专业监测预警点和从 2018 年开始实施的宜昌市综合防治体系群专结合专业监测预警点 2 类。其中后者又分为一级、二级与三级专业监测预警点, 以二级和三级为主。表 1 总结了相应的主要监测技术方法手段及其基本特征。

表 1 三峡库区秭归段地质灾害主要专业监测技术方法及特征

Table 1 Main professional monitoring techniques and characteristics of geological disasters in the Zigui section of the Three Gorges Reservoir

专业监测类型		主要监测技术手段	基本特征
三峡库区专业监测点		人工 GNSS、人工测斜、人工地下水; 自动 GNSS、自动地表裂缝、自动深部测斜、自动雨量计、自动深部测斜+地下水综合孔、自动下滑力、水库水位	早期以人工方法为主, 近期则以自动监测为主, 较全面覆盖了地表变形、深部变形以及诱发因素监测
宜昌综合防治体系群专结合专业监测点	二级监测点	自动 GNSS、自动地表裂缝、自动深部测斜、自动雨量计、自动地下水、声光报警器	以自动普适性 GNSS+裂缝等地表形变监测为主, 少量辅以自动深部形变+自动雨量监测
	三级监测点	自动倾角加速度计、自动 GNSS、自动雨量计、自动地表裂缝、声光报警器	以自动普适性倾角加速度计结合自动 GNSS 等地表形变监测+自动雨量监测为主

3 专业监测技术方法的应用效果分析

结合区内代表性灾害体的典型监测数据, 分析总结主要监测技术方法的优缺点, 同时结合斜坡变形的 3 阶段演化特征(图 2), 开展适宜性分析。

初始变形阶段(AB 段): 该阶段坡体开始出现裂缝和微小位移, 变形速率先快速增加, 之后逐渐减缓, 地表

开始出现可见的变化。在这个阶段的监测重点是捕捉早期的变形迹象, 通过高精度高灵敏度的监测手段及时发现变形趋势, 为进一步的分析和预警提供数据支持。

等速变形阶段(BC 段): 该阶段是滑坡发展中的一个相对稳定期, 此时变形速率保持相对恒定。这个阶段的监测重点是持续跟踪变形速率, 确保能够及时发现任何可能的加速趋势。

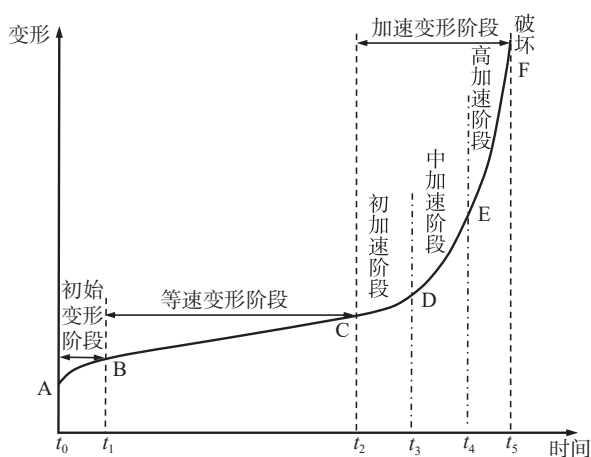
图 2 斜坡变形的三阶段演化图示^[29]

Fig. 2 Three-stage evolution diagram of slope deformation

加速变形阶段(CF段): 该阶段预示着滑坡可能即将发生, 此时变形速率显著加快, 监测技术需要具备高灵敏度和实时性, 以便快速响应变形加速事件, 并及时发出预警。

在三峡库区秭归段的实际监测中, 针对这 3 个阶段, 相关部门采用了多种专业监测技术方法。这些技术包括但不限于自动 GNSS 地表位移监测、自动地表裂缝监测、自动深部测斜监测、自动雨量监测等。

3.1 人工监测技术方法

3.1.1 形变监测

(1) GNSS 人工地表位移监测

从 2003 年三峡库区开始实施地质灾害专业监测预警工程开始至今已有 20 年, GNSS 人工地表位移监测已被广泛认为是最可靠、最实用的地表位移监测手段。其通过在灾害体上建立永久监测墩, 采用静态 GPS 测量方法定期采集数据, 平面标称精度可以达到 2 mm。图 3 展示了区内三门洞滑坡的 GPS 累计位移-时间监测曲线^[29-30]。可以看出: 三门洞滑坡自 2006 年 10 月开始实施专业监测以来, 滑坡整体持续变形, 受库水位和降雨影响, 累计位移监测曲线出现“阶跃现象”, 分析认为 2021 年三门洞滑坡存在蠕动变形, 处于欠稳定状态。

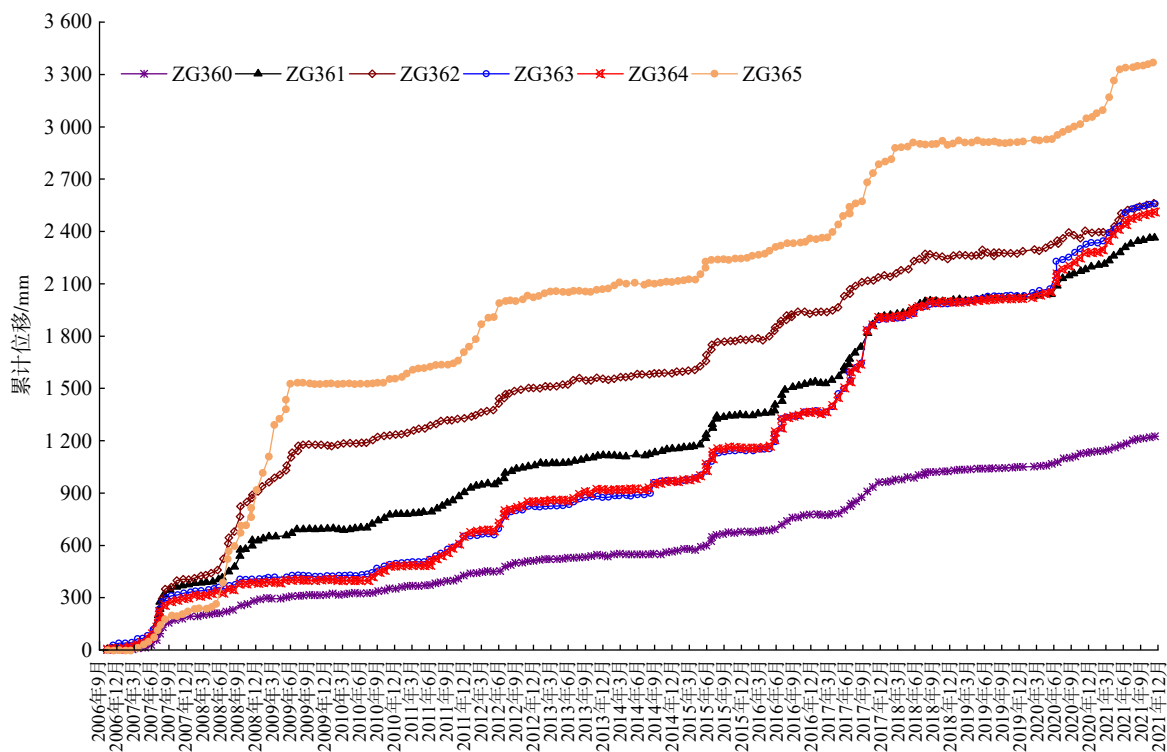


图 3 GNSS 人工监测点累计位移-时间曲线(三门洞滑坡)

Fig. 3 GNSS cumulative displacement-time curve of manual monitoring points (Sanmendong landslide)

优点: 平面精度高, 仪器及安装成本低, 连续性好 (只要人类通行不受影响, 就可以持续开展), 适用于监测滑坡在初始变形阶段的微小位移。

缺点: ①完全依靠人力放置仪器采集数据, 人力成本

高; ②监测频率低 (一般 1 次/月、汛期加密 2 次/月), 导致数据时间分辨率低; 单点监测时间长 (1~2 h); ③变形数据需要再经过室内处理, 效率较低; 无法及时预警。

适宜性: ①适于长期蠕变型滑坡的初始变形-等速

变形-初加速等阶段的地表变形监测,能够提供关键的长期变形数据;②对于可能发生快速变化的短期突发性灾害体,或已进入中加速至加加速阶段的滑坡,人工 GNSS 监测可能不足以提供必要的实时数据,此时应考虑结合自动监测技术以提高响应速度。

(2)人工深部测斜监测

深部测斜的主要目的是找准灾害体的滑面位置、监测灾害体的深部位移变形。图 4 展示了区内胡家坡滑坡与千将坪滑坡的深部位移监测曲线^[30]。可以看出:2021 年,千将坪滑坡 QK3-A 方向和 QK4-A 方向无明显变形;胡家坡滑坡 QK1 孔内 A 方向位移突变(位移由负值变为正值或正值变负值)发生于 2021 年 6—8 月和

11—12 月,总体位移变化不大。
优点:可以获得滑体深部全断面的监测数据,是准确确定滑面位置的最佳方法,典型地如图 4 中的胡家坡滑坡监测曲线。
缺点:①完全依靠人力放置仪器采集数据,仪器安装方面要求高,需明确滑带位置,安装不到位容易失效,人力成本高;②监测频率低(一般 1 次/月、汛期加密 2 次/月),导致数据时间分辨率低;③深部变形较大的监测孔容易变形甚至剪断,导致无法持续采集大变形后的深部数据;④对于深部变形不明显或滑带位置不明确的灾害体,监测曲线难以合理解释(如图 4 千将坪滑坡监测曲线)。

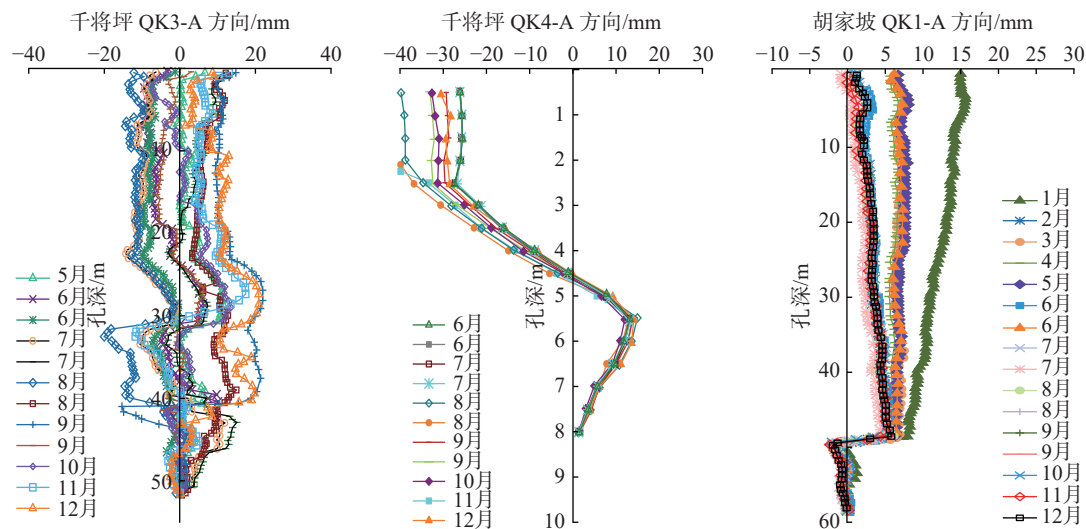


图 4 人工深部测斜累计位移-时间曲线
Fig. 4 Cumulative displacement-time curve of artificial deep inclinometer

适宜性:①适于确定具有深部变形灾害体的滑面位置,适于监测处于长期蠕变但总变形量不大的灾害体;②对于那些可能经历快速或剧烈变形的滑坡,建议结合其他监测技术,如自动深部测斜或 GNSS 自动监测,以提高监测的实时性和连续性。

3.1.2 诱因监测

人工地下水位监测:灾害体内地下水位受地表降雨、库水升降等综合作用,地下水位与影响灾害体稳定性的水压力密切相关,因此开展地下水位监测旨在建立地下水与滑坡变形之间的量化关系,从而为滑坡预警提供依据。图 5 是胡家坡滑坡传统人工地下水位监测曲线^[30]。可以看出:胡家坡滑坡 zg-hjp-szk1 孔和 zg-hjp-szk2 孔内地下水位波动范围分别为-0.06~0.17 m、-0.01~0.05 m,整体看来,地下水位变化不明显。

优点:可以获得与 GNSS 人工地表位移、人工深部

测斜等同周期频率的地下水位变化情况,为灾害体稳定性计算模拟提供水文条件,为开展灾害体成因机制研究提供基础数据。

缺点:①完全依靠人力放置仪器采集数据,人力成

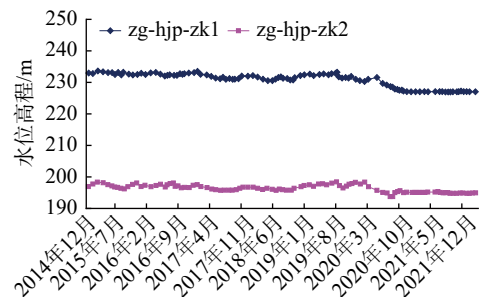


图 5 人工地下水位监测曲线(胡家坡滑坡)
Fig. 5 Artificial groundwater level monitoring curve (Hujiaopo landslide)

本高;②监测频率低(一般 1 次/月、汛期加密 2 次/月),导致数据时间分辨率低;③深部变形较大的监测孔容易变形甚至剪断,导致无法持续采集大变形后的水位数据。

适宜性:适于地下水位受外界诱因变化而存在明显变化的灾害体。同时,地下水位监测应至少形成监测剖面,最好形成监测网,单点或少数点的地下水位监测实际意义不大。

3.2 自动监测技术方法

3.2.1 形变与应力监测

(1)GNSS 自动地表位移监测

随着物联网传感器、北斗等 GNSS 技术、实时自动化采集、传输与处理技术等快速发展和普及应用,GNSS 自动地表位移监测正在迅速替代传统 GNSS 人工监测,成为地质灾害专业监测中最被优先选择的技术之一。图 6 展示了区内马家沟 1 号滑坡的 GNSS 自动地表累计位移监测曲线^[30]。可以看出:GPS 自动监测点

的变形呈同步增长的趋势,分析认为马家沟滑坡 I 号滑体处于蠕变变形状态。

优点:①高精度,其标称精度(平面精度 2 mm、高程精度 5 mm)已经可以达到人工 GNSS 的标称精度;②监测频率高,实时性好,可以准实时采集、传输和展示监测数据,可以根据需要动态调整监测频率;③相较于 GNSS 人工监测,GNSS 自动地表位移监测成本相对较低,适合作为普适性仪器推广;④可以为持续完整变形过程监测与后期分析提供精细化基础数据。

缺点:①监测点选择不合适的情况下,容易受到外界因素(人为移动、遮挡、长期阴雨天气等)影响而出现数据中断、异常等情况;②最终位移变形数据的精度和可靠性受后台解算能力影响,作为非专业人员无法有效评估。

适宜性:广泛适用于长期蠕变型或短期突发性型灾害体在整个变形-破坏阶段的地表变形监测。

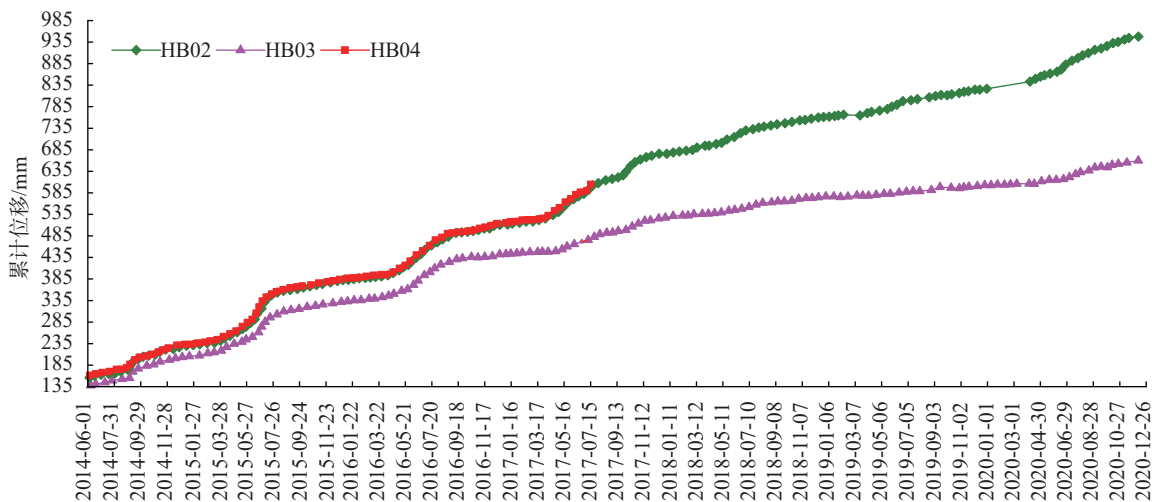


图 6 GNSS 自动地表累计位移时间监测曲线(马家沟 1 号滑坡)

Fig. 6 Automatic GNSS surface cumulative displacement-time monitoring curve (Majiagou No.1 landslide)

(2)自动地表裂缝监测

地表裂缝监测作为 GNSS 地表位移变形监测的补充手段,旨在重点监测灾害体边界及坡体上重点部位或重要影响对象(如建筑物等)的裂缝变化扩展情况。图 7 展示了区内卧沙溪滑坡的自动地表裂缝监测曲线^[30]。可以看出:位于次级滑体右侧边界上的地表裂缝监测点 LF1 的变形与水库水位下降和降雨呈正相关,地表裂缝位移时间监测曲线 2018 年度呈现 2 个变形加剧跃升期,第一个跃升期为三峡水库水位从 2018 年 2 月份下降引起的变形加剧,第二个跃升期为 2018 年 5 月份库水位快速下降引起变形加剧,直至位移计被破坏。

优点:①高精度,标称精度可以达到 0.5 mm;监测频率高,实时性好,可以实时采集、传输和展示监测数据,可以根据需要动态调整监测频率;②成本较低,适合作为普适性仪器推广。

缺点:①对安装环境要求较高,根据应用经验,由于大多数灾害体没有明显的边界裂缝或者边界裂缝变形不显著,导致难以在安装时选择最佳位置,进而导致后期监测数据大多呈现变化不明显;②长距离穿越布置极易受到人类活动等外界干扰导致数据异常跳动;③仪器设备成熟度欠佳,常出现数据中断、数据异常跳动等情况(图 7),导致监测数据难以解译。

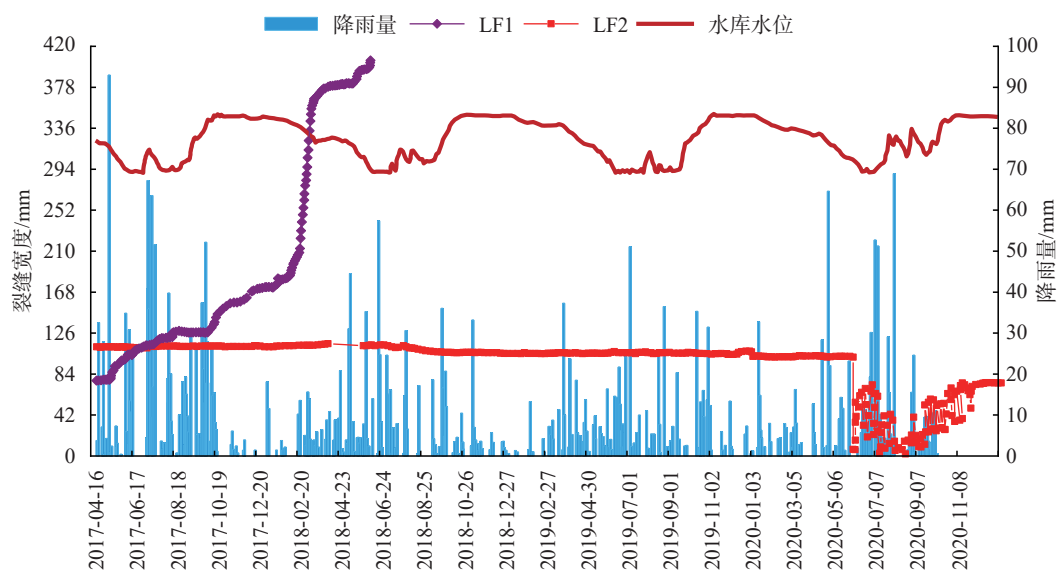


图7 自动地表裂缝位移时间监测曲线(卧沙溪滑坡)

Fig. 7 Automatic surface crack displacement-time monitoring curve (Woshaxi landslide)

适宜性: ①在初始变形阶段,地表裂缝监测是捕捉滑坡活动早期迹象的关键技术,能够提供裂缝形成和扩展的精确数据,为早期识别滑坡趋势提供依据。②等速变形阶段,裂缝监测的高频率数据采集能力有助于持续追踪裂缝变化,评估滑坡稳定性,并辅助调整监测策略。③加速变形阶段,裂缝监测技术需要与其他高灵敏度监测手段(如自动 GNSS)结合使用,以确保能够及时捕捉到快速变化并发出预警;④在灾害体上大量应用可能效果不佳,建议首先进行充分的现场调查,以识别并精选出具有典型代表性的边界或建筑物等裂缝进行少而精的安装监测。同时,应尽量避免长距离穿越布置,从而尽量避免人类活动等外界干扰。

(3) 自动倾角加速度监测

自动倾角加速度计迅速成为普适性专业监测设备的重要选择,其目前主要应用于三级专业监测点上。图8展示了区内桃树坪不稳定斜坡上倾角加速度计的布置与监测数据情况^[31]。可以看出:桃树坪不稳定斜坡整体监测工作正常、稳定,数据采集工作正常、连续。

优点: ①灵敏度高,能及时捕捉一些微小的变化;②集成度高,功耗低;③体积小,安装方便,并且与人工监测相比,成本较低,适合作为普适性仪器推广。

缺点: 易受制备过程中精度不够以及外界因素(如温度、振动、人类工程活动等)影响,常存在误差较大、数据无法有效解译的问题。

适宜性: 有效性应进一步验证,可能适于监测突变型滑坡或者崩塌。为了提高监测数据的准确性和可靠性,建议在安装时选择地质条件稳定、受外界干扰较小

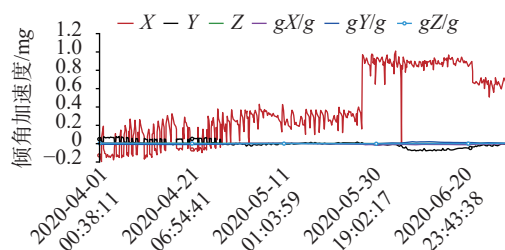


图8 全自动 MEMS 倾角加速度累计值与时间关系曲线图

(桃树坪不稳定斜坡)

Fig. 8 The relationship curve between the cumulative value of automatic MEMS tilt acceleration and time (Taoshuping unstable slope)

的位置,并考虑采取隔离措施减少温度和振动的影响。

(4) 自动测斜监测

自动测斜监测旨在代替人工手动深部测斜,实现对灾害体内部的变形监测^[32]。但与人工深部测斜采集全断面数据不同的是,自动测斜通常是在滑体、滑面等具有明显变形差异的位置安装1到多组测斜探头,通过各探头的倾斜数据换算得到探头位置的位移变形数据。图9展示了区内马家沟滑坡的自动测斜监测数据曲线^[30],可以看出:2017年7—8月,测斜孔设备故障缺失监测数据,其余时间数据采集正常,2019年以来无明显变形。

优点: ①省时省力;②监测频率高,实时性好,可以实时采集、传输和展示监测数据,可以根据需要动态调整监测频率;③可以根据灾害体具体情况针对性选择安装测斜探头的数量与位置。

缺点: ①根据应用经验,监测曲线经常发生跳动、回落甚至取反(由正变负或由负变正),难以解译其物理

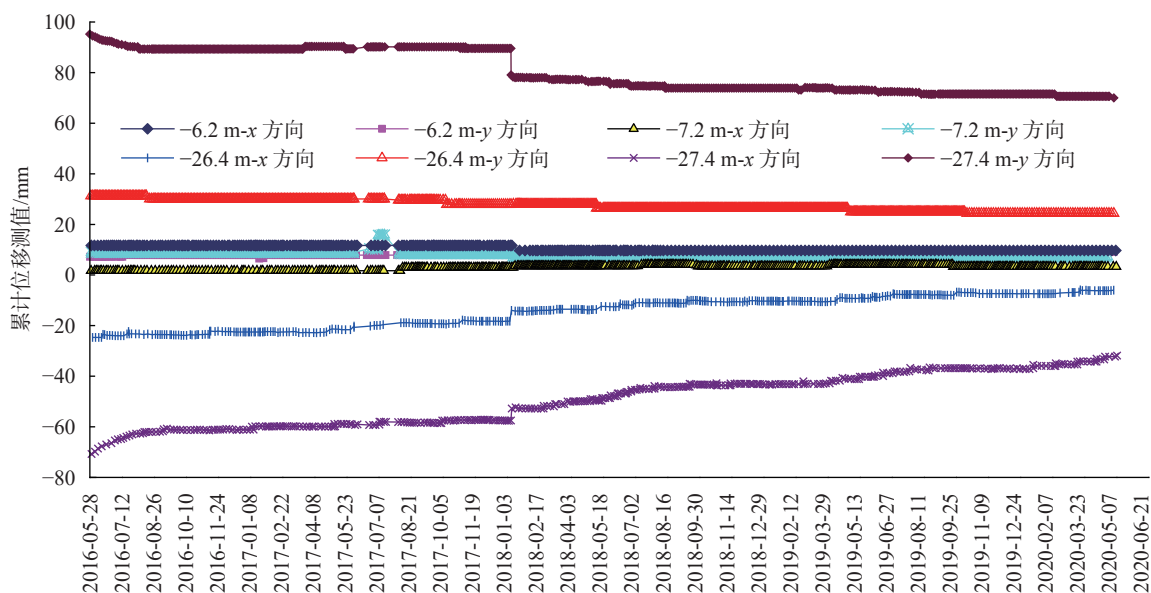


图 9 自动深部测斜监测曲线(马家沟滑坡)

Fig. 9 Automatic deep inclinometer monitoring curve (Majiagou landslide)

意义;②当前使用的仪器设备尚未完全成熟,常出现传感器探头失效,进而导致数据中断、数据异常跳动等情况,且故障原因难以定位和解释;③安装要求较高,且安装质量难以保证(比如多个探头是否各自安装到位、探头方向是否准确等)。

适宜性:①自动深部测斜监测技术在实际应用中表现出一定的局限性,应持续提升仪器的稳定性和数据的可解释性,改善安装质量。②发展能适应大变形的全断面深部位移监测仪器,降低安装复杂性以及设备成本。

(5) 自动测斜、地下水位综合监测

深部综合监测孔是利用同一深部钻孔,同时安装自动测斜仪与自动地下水位监测仪。图 10 展示了安装于谭家河滑坡内的一综合监测孔的测斜与水位数据^[30]。可以看出:谭家河滑坡地下水位主要受库水位周期性涨落影响,滑坡测孔中部探头(-42.5 m)位移在 2019 年 5 月发生一次较大变形,也就是滑带所在的位置,该滑坡为整体滑移的深层基岩滑坡。

优点:综合孔发挥了自动深部测斜和自动地下水位实时动态监测的优势,节省了安装成本。

缺点:①同单一的自动深部测斜监测一样,常出现数据异常、物理意义不明、安装质量难以保障等问题;②一旦仪器设备损坏,理论上虽然可以更换,但实际上可能由于测斜孔的问题导致完全失效。

适宜性:在能尽量确保安装质量与仪器质量的情况下,综合孔大大提升了监测效率,但应根据具体监测需求(比如偏重成因机制分析的持续监测)慎重选择、谨

慎安装,确保持续采集到可靠数据。

(6) 自动下滑力监测

滑坡的变形破坏原因都是滑坡体内力平衡被打破导致的。理论上,当下滑力大于抗滑力后,滑坡会发生持续沿斜坡的位移变形。因此,对下滑力的变化监测有助于指示滑坡体是否发生真实位移变形。

图 11 显示了卡子湾滑坡下滑力监测孔 TK1、TK2 于 2020 年 7 月 22 日完成力学传感器设备更换后重新记录的推力监测曲线^[30]。可以看出:7 月 22 日之后,监测孔 TK1(位于预警区中部)下滑力下降 17 kN,监测孔 TK2(位于预警区后部)下滑力上升 188 kN,表明预警区滑体处于蠕动变形状态。

优点:①理论上可以直接获得坡体内某点的前后推力变化情况,从而为成因机制研究与基于力学变化的灾害体预警提供了可能;②能够适应大变形。

缺点:安装要求较高,且数据变化过程的物理意义不很明确,坡体内某一点力的变化是否能代表灾害体的内力变化难以解释清楚。

适用性:①作为前述专业监测技术方法的补充,可能有助于理解和分析灾害体变形过程中的内力变化情况。②在初始变形阶段,能够提供关于坡体内力平衡变化的早期迹象。在等速变形阶段,有助于监测滑坡体的稳定性,通过连续的下滑力监测,可以评估滑坡的当前状态和潜在风险。在加速变形阶段,其重要性更加显著,能够实时捕捉到滑坡体内下滑力的急剧变化,为预警和应急响应提供关键信息。

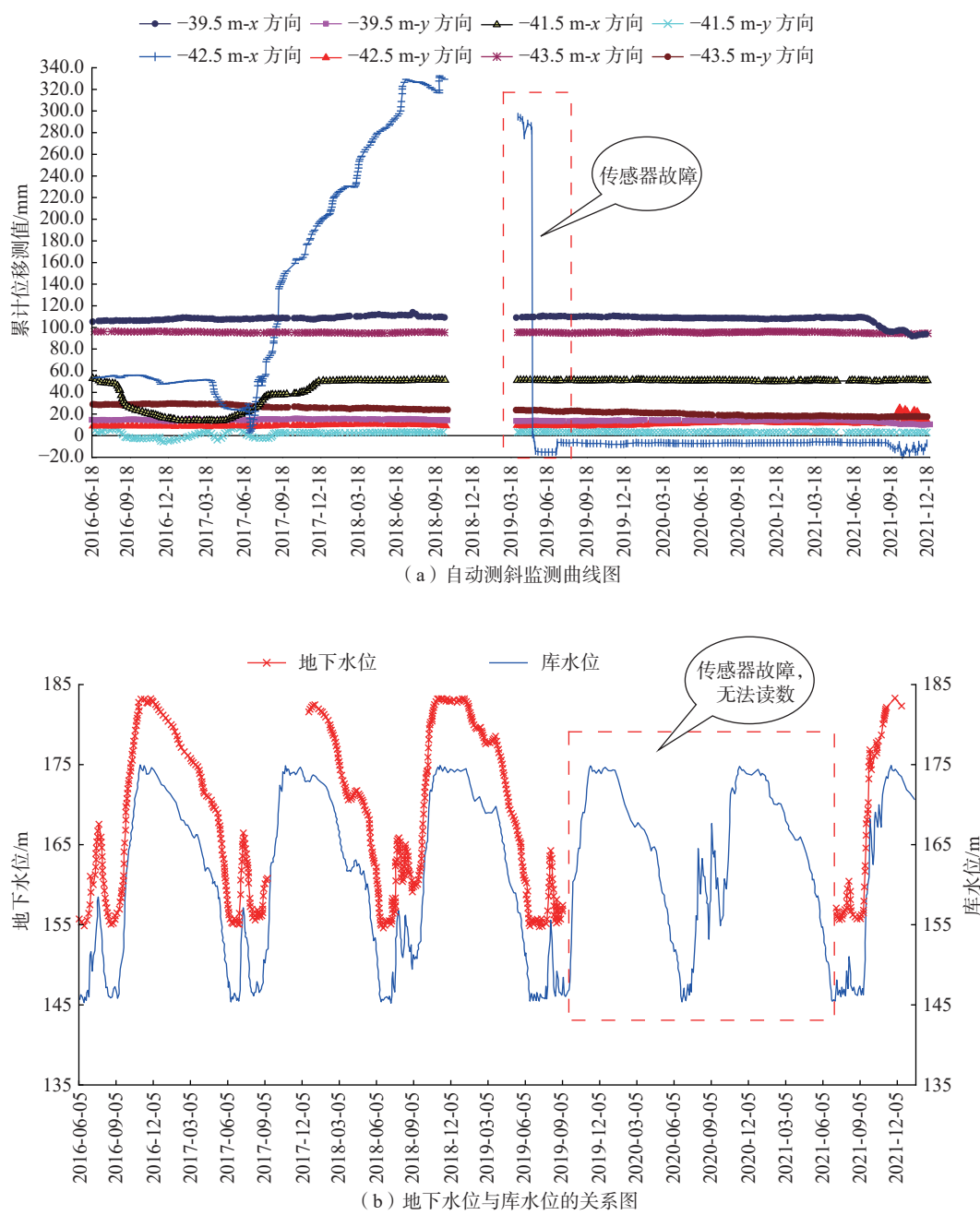


图 10 自动测斜+地下水位综合监测数据(谭家河滑坡)

Fig. 10 Automatic inclinometer + comprehensive monitoring data of groundwater level (Tanjiahe landslide)

3.2.2 诱因监测

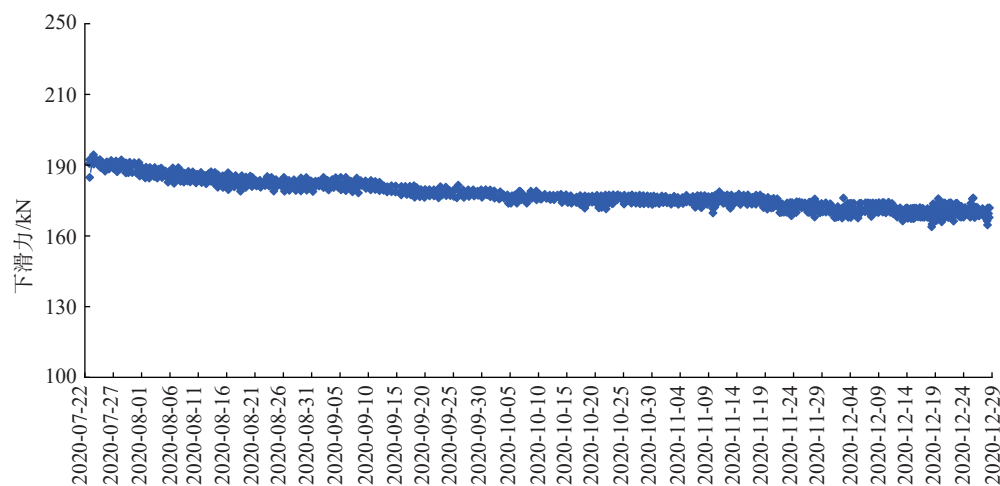
(1)自动雨量监测

降雨作为诱发地质灾害的最主要因素之一,开展降雨量实时自动化监测,既便于联合 GNSS 等其他实时自动化监测数据进行变形过程与成因机理分析,也可以作为地质灾害预警的重要数据源。因此在监测灾害体变形等自身因素的同时,开展自动化降雨量监测非常必要。图 12 展示了安装于椅子圈-马家坝风险区内的一台自动雨量计的数据^[33]。可以看出:2022 年 8

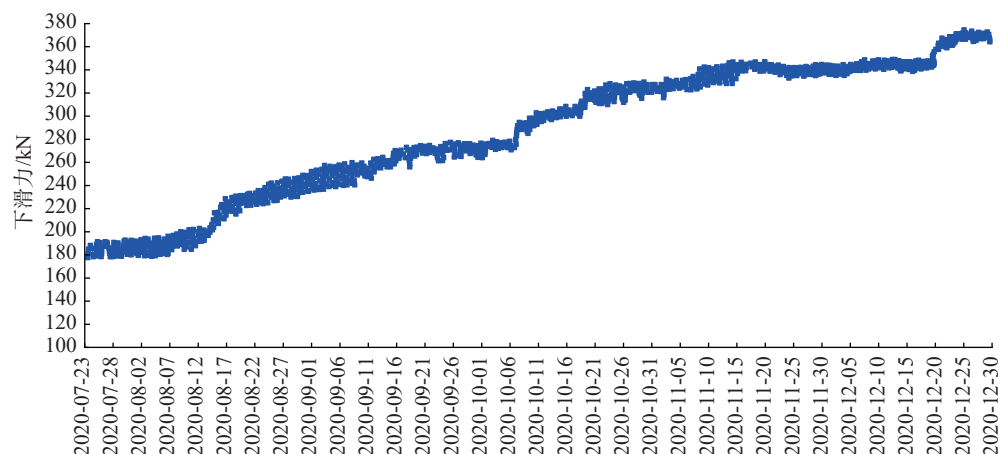
月至 12 月,椅子圈-马家坝风险区降雨主要集中在 10 月和 11 月。

优点:①数据精度高;②数据采集连续;③成本较低,适合作为普适性仪器推广;④可实时发送监测数据,有利于建立诱发滑坡变形破坏的降雨量阈值并开展及时预警。

缺点:①翻斗式自动雨量计容易被灰尘、落叶、鸟粪等堵塞,从而造成数据中断缺失;②会存在少量数据失真的现象,原因不好确定。



(a) TK1 监测孔下滑力自动监测曲线



(b) TK2 监测孔下滑力自动监测曲线

图 11 卡子湾滑坡自动下滑力监测数据

Fig. 11 Monitoring data of automatic sliding force of Kaziwan landslide

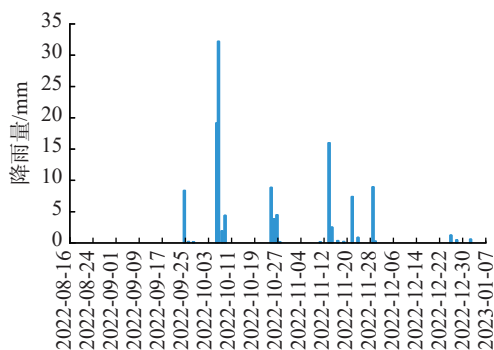


图 12 自动降雨量监测柱状图(椅子圈-马家坝风险区)

Fig. 12 Automatic rainfall monitoring histogram
(Yiziqian-Majiaba risk area)

适宜性: ①广泛适用于长期蠕变型或短期突发性型灾害体在整个变形-破坏阶段的降雨量监测; ②由于降雨分布极不均匀, 因此应尽量确保每个灾害点上都有对应的自动雨量计, 距离较近时可以共用。

(2) 自动地下水位监测

同自动测斜或自动测斜结合地下水位综合监测一样, 准确的自动地下水位监测可以实时采集、传输和展示地下水位变化情况, 从而为灾害体的成因机制分析甚至基于地下水变化的灾害预警提供重要基础数据。自动地下水监测曲线如图 10(b) 所示。

优点: 可以获得与自动 GNSS、自动降雨量等同周期频率的地下水位变化情况, 为灾害体稳定性计算模拟提供水文条件, 为开展灾害体成因机制研究提供更加精细化的基础数据。

缺点: 由于深埋于地下水位以下, 仪器设备容易出现故障, 常会出现数据跳动、中断等异常情况, 见图 10(b), 难以定位问题、难以维护修理。

适宜性: 适于地下水位受外界诱因变化而存在明显变化的灾害体。同样, 地下水位监测应至少形成监测剖

面,最好形成监测网,单点或少数点的地下水位监测实际意义不大。

4 对三峡库区滑坡专业监测的建议

4.1 针对斜坡变形阶段

基于上述专业监测技术方法的典型应用及其优缺点与适用性分析结果,考虑到研究区内主要滑坡灾害(无论是水库型滑坡还是降雨型滑坡)均遵循斜坡变形的三阶段演化特征与过程(图 2),同时根据《三峡库区滑坡灾害预警预报手册》提出的地质灾害四级预警机

制,建立表 2 所示的对应斜坡不同变形阶段以及预警级别的专业监测技术方法推荐组合。

总体上,自动 GNSS+自动降雨量监测是适用于所有斜坡变形阶段监测的首选技术;接下来根据具体需求和灾害体实际情况,可以有选择地增加少量自动地表裂缝监测与自动倾角加速度监测;如果要全面跟踪灾害体变形过程以及其变形机理,应增加自动测斜与自动地下水位监测,但探头式自动测斜仪与自动地下水位计的安装应以手动测斜及人工地下水位监测所确定的潜在滑带位置作为依据,而且要确保安装质量。

表 2 对应斜坡变形阶段与预警级别的专业监测技术方法建议表

Table 2 Suggestion table of professional monitoring technology corresponding to slope deformation stages and early warning levels

变形阶段	初始变形阶段	等速变形阶段	初加速阶段	中加速阶段	高加速(临滑)阶段	
预警级别	—	注意级	警示级	警戒级	警报级	建议说明
警报形式	—	蓝色	黄色	橙色	红色	
GNSS人工地表位移监测			不推荐			用自动GNSS监测替代
人工深部测斜位移监测						在灾害体初始变形-等速变形初期,用于准确确定滑带位置;持续监测采用全断面自动监测技术
人工地下水位监测						用于初次准确确定地下水位位置;持续监测采用自动地下水位监测,且至少布设一个监测剖面或监测网
GNSS自动地表位移监测						首选,但要确保监测点位选择合理且不会受到扰动及信号遮挡等导致的数据中断或质量问题
专业监测技术方法适宜性						
自动地表裂缝监测						适于安装在有明显拉张过程但跨度近且不受外界干扰的边界裂缝上,其他情形下不推荐使用
自动倾角加速度监测						对监测效果进行针对性评估后选择
自动测斜监测						建议研发全断面自动测斜监测仪器或对探头式仪器进行改进后,在能确保监测数据质量情况下使用
自动测斜+地下水位综合监测						在能确保安装质量及测斜数据质量前提下可选择
自动雨量监测						首选,确定灵敏度并定期维护,防治堵塞
自动地下水位监测						必要情况下可选择
自动下滑力监测						对监测效果进行针对性评估后选择
图例说明						

此外,除了自动降雨量与自动地表裂缝监测外,其他监测技术都应形成监测剖面或监测网,这样才有利于全面监测整个灾害体的完整变形情况与诱因变化情况,从而为揭示成因机理、建立预警阈值并最终实现监测预警目标提供依据。

4.2 针对不同变形特征

根据专业监测资料^[30-31],目前区内地质灾害变形主要存在整体蠕动变形、部分区域蠕动变形、局部变形以及无明显变形等几类。其中整体或部分区域蠕动变形按照地表累计位移监测曲线形态,又可以分为阶跃上

升型与持续上升型 2 种。表 3 总结并提出了对应上述变形特征灾害体的专业监测技术方法选择。

5 结论与展望

(1)自动 GNSS 地表位移监测、自动雨量监测以及自动地下水位监测成本相对较低,对环境及仪器安装方面要求较低,适合作为普适性仪器推广。

(2)针对斜坡变形阶段,自动 GNSS 地表位移结合自动降雨量是适用于所有斜坡变形阶段监测的首选技术,接下来根据具体需求和灾害体实际情况,适当增加

表 3 对应不同变形特征灾害体的专业监测技术方法建议表

Table 3 Recommendation table for professional monitoring technical methods for disaster bodies with different deformation characteristics

变形特征	代表性灾害体	首选监测技术	补充监测技术	说明
整体蠕动变形	阶跃上升型 持续上升型 三门洞滑坡、 马家沟1号滑坡 木鱼包滑坡、 谭家河滑坡	GNSS自动地表位移(形成监测网)+ 自动雨量(1台)	自动地表裂缝(边界少量)/ 自动测斜(至少形成监测剖面)/自动 地下水位(至少形成监测剖面)	除1台雨量计及少量裂缝计外, 其余设备应根据灾害体规模 形成监测剖面或监测网
部分蠕动变形	阶跃上升型 持续上升型 卧沙溪滑坡 次级滑体 卡子湾滑坡 预警区	GNSS自动地表位移(形成监测网, 变形区内应加密)+自动雨量(1台)	自动地表裂缝(变形区边界少量)/自动测斜 (大变形不宜安装,布设应形成监测剖面)/自动 地下水位(至少形成监测剖面,变形区内可加密)	针对灾害体整体形成监测剖面 或监测网,但重点是变形区
局部变形	王家院子滑坡、 黑石板滑坡	GNSS自动地表位移(形成监测网, 变形区内应加密)+自动雨量(1台)	局部变形区如果范围较大,可以按上述推荐布设; 如果较小,根据实际需要少量布设或不布设	根据局部变形区的规模、特征与 预警需求进行考虑后灵活选择
无明显变形	大岭西南滑坡	GNSS自动地表位移(形成 监测网)+自动雨量(1台)	—	—

其余监测技术。

(3)针对不同变形特征,以代表性灾害点为例,自动 GNSS 地表位移结合自动降雨量是首选技术,再结合实际变形情况,适当增加其余监测技术。

目前,对于短期突发型滑坡,往往很难提前进行监测预警,并非其变形破坏过程不符合 3 阶段演化规律(图 2)、也并非其受限于监测预警技术手段的缺失,究其原因主要还是缺乏对该类灾害的早期识别,从而导致错过了对其初始变形阶段到等速变形阶段的持续跟踪监测。因此,对于这类滑坡隐患,首先应重点加强早期识别,以达到提前发现这些长时间并无明显变形迹象但可能已处于孕灾早期阶段或初始变形阶段、甚至是等速变形阶段的隐患体;然后针对这些出现变形的隐患体开展长期重点监测,即按照监测规范布设固定的自动 GNSS 地表位移监测、降雨量监测等必要技术,根据需求和隐患体实际增加必要的地表裂缝、倾角加速度计、深部测斜、地下水位等自动化监测手段,形成完整的监测网络,同时开展定期宏观巡查;在连续获得监测数据情况下,逐步建立包括改进切线角、位移速率、宏观变形迹象等变形预警模型及其阈值,降雨、库水位变化等诱因预警模型及其阈值,以及其他预警模型及其阈值等,构建最终的灾害综合预警模型,实现防灾目标。

参考文献(References):

[1] 吴树仁,石菊松,王涛,等.滑坡风险评估理论与技术[M].北京:科学出版社,2012. [WU Shuren, SHI Jusong, WANG Tao, et al. Theory and technology of landslide risk assessment [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]

[2] 邓李政,袁宏永,张鸣之,等.滑坡变形监测预警技术研究进展[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(6): 849 - 864. [DENG Lizheng, YUAN Hongyong, ZHANG Mingzhi, et al. Research progress on landslide deformation monitoring and early warning technology [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(6): 849 - 864. (in Chinese with English abstract)]

[3] AUFLIČ M J, HERRERA G, MATEOS R M, et al. Landslide monitoring techniques in the geological surveys of Europe [J]. Landslides, 2023, 20(5): 951 - 965.

[4] 吴北平,李征航,徐绍铨.GPS 定位技术在三峡库区崩滑地质灾害监测中的试验分析[J].地球科学,2001,26(6): 648 - 652. [WU Beiping, LI Zhenghang, XU Shaoquan. Application of GPS satellite positioning technique to monitoring of landslides in Three Gorges dam [J]. Earth Science, 2001, 26(6): 648 - 652. (in Chinese with English abstract)]

[5] 曾旭平,王志平,李明福.GPS 测定垂直位移在三峡滑坡监测中的实现[J].人民长江,2001,32(6): 6 - 8. [ZENG Xuping, WANG Zhiping, LI Mingfu. Implementation of landslide monitoring in Three Gorges Reservoir area with GPS taking the place of precise leveling [J]. Yangtze River, 2001, 32(6): 6 - 8. (in Chinese with English abstract)]

[6] 徐绍铨,李英冰.GPS 用于滑坡监测的试验与研究[J].全球定位系统,2003,28(1): 2 - 8. [XU Shaoquan, LI Yingbing. The test and study on coast safety monitoring by GPS [J]. GNSS World of China, 2003, 28(1): 2 - 8. (in Chinese with English abstract)]

[7] 范宏喜,王琼杰.三峡地灾预警工程启动[N].中国矿业报,2001-07-10(003). [FAN Hongxi, WANG Qiongjie. Three Gorges Geological Disaster Warning Project Started [N]. China Mining, 2001-07-10 (003). (in Chinese)]

- [8] 刘传正,杨冰.三峡库区地质灾害调查评价与监测预警新思维 [J]. *工程地质学报*, 2001, 9(2): 121 - 126. [LIU Chuanzheng, YANG Bing. A new thought of surveying, evaluating, monitoring and forecasting for the geologic hazards in the Three-Gorges on Changjiang River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(2): 121 - 126. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 国土资源部.三峡库区地质灾害防治总体规划(简本) [J]. *国土资源通讯*, 2002(3): 5 - 9. [Ministry of Land and Resources. Master plan for prevention and control of geological disasters in the Three Gorges Reservoir area (simplified version) [J]. *National Land & Resources Information*, 2002(3): 5 - 9. (in Chinese)]
- [10] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部.三峡库区地质灾害监测预警工程实施方案 [R]. 2002. [Three Gorges Reservoir Area Geological Disaster Prevention and Control Work Headquarters. Three Gorges Reservoir area geological disaster monitoring and early warning project implementation plan [R]. 2002. (in Chinese)]
- [11] 谢登科.三峡库区二期地灾治理基本完成 [N]. *中国矿业报*, 2004-05-13. [XIE Dengke. The second phase of geological disaster control in the Three Gorges Reservoir area has been basically completed [N]. *China Mining Daily*, 2004-05-13. (in Chinese)]
- [12] 叶润青,付小林,郭飞,等.三峡水库运行期地质灾害变形特征及机制分析 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 680 - 692. [YE Runqing, FU Xiaolin, GUO Fei, et al. Deformation characteristics and mechanism analysis of geological hazards during operation period of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 680 - 692. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 侯俊东,侯魁予,吕军,等.三峡库区地质灾害监测预警工程经济效益评估分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2012, 23(2): 64 - 69. [HOU Jundong, HOU Suyu, LYU Jun, et al. Analysis on economic benefit evaluation of geological disaster monitoring & warning engineering for Three Gorges Reservoir area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23(2): 64 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 江鸿彬.初论地质灾害监测预警体系建设 [J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(4): 526 - 529. [JIANG Hongbin. Construction of geological disaster monitoring and early warning system [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(4): 526 - 529. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 湖北省自然资源厅.湖北省地质灾害综合防治体系建设方案(2018-2022年) [EB/OL]. 2018. [Hubei Provincial Department of Natural Resources. Construction scheme of comprehensive prevention and control system of geological disasters in Hubei Province (2018-2022) [EB/OL]. 2018. (in Chinese)]
- [16] 许强.对滑坡监测预警相关问题的认识与思考 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 360 - 374. [XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: Consideration to practical issues [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 360 - 374. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 许强.滑坡监测预警的理论与实践 [J]. *中国减灾*, 2022(19): 34 - 37. [XU Qiang. Theory and practice of landslide monitoring and early warning [J]. *Disaster Reduction in China*, 2022(19): 34 - 37. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 黄海峰,易武,张国栋,等.典型顺层岩质水库滑坡隐患综合遥感识别方法与实践 [M]. 北京:科学出版社, 2023. [HUANG Haifeng, YI Wu, ZHANG Guodong, et al. Comprehensive remote sensing identification method and practice of landslide hazards in typical bedding rock reservoirs [M]. Beijing: Science Press, 2023. (in Chinese)]
- [19] 隋嘉,孙皓,张丽华,等.青海省地质灾害监测预警信息化平台建设与实践 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(2): 92 - 101. [SUI Jia, SUN Hao, ZHANG Lihua, et al. Construction and realization of information platform for geological disaster monitoring and early warning in Qinghai Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 92 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 田尤,陈龙,黄海,等.藏东察雅县城地质灾害风险评价及源头管控对策建议 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(2): 146 - 154. [TIAN You, CHEN Long, HUANG Hai, et al. Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya County, eastern Xizang [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(2): 146 - 154. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 赵永红,王航,张琼,等.滑坡位移监测方法综述 [J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(6): 2606 - 2612. [ZHAO Yonghong, WANG Hang, ZHANG Qiong, et al. Overview of landslide displacement monitoring methods [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(6): 2606 - 2612. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 许威,李鹏辉,盛玉兴,等.滑坡监测方法综述与展望 [J]. *安徽建筑*, 2020, 27(8): 92 - 94. [XU Wei, LI Penghui, SHENG Yuxing, et al. Summary and prospect of landslide monitoring methods [J]. *Anhui Architecture*, 2020, 27(8): 92 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 杨江涛,李波,李伯宣,等.自贡市地质灾害专群结合监测预警模式升级与实践 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 130 - 134. [YANG Jiangtao, LI Bo, LI

- Boxuan, et al. Upgrading and practice of early warning mode of geological disaster special group combination in Zigong City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 130 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [24] FRATTINI P, CROSTA G B, ROSSINI M, et al. Activity and kinematic behaviour of deep-seated landslides from PS-InSAR displacement rate measurements [J]. *Landslides*, 2018, 15(6): 1053 – 1070.
- [25] 戴粤, 戴吾蛟, 余文坤. 综合地表与深部位移监测数据的滑坡多目标加权位移反分析方法 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2149 – 2159. [DAI Yue, DAI Wujiao, YU Wenkun. A landslide multi-objective weighted displacement back analysis method synthesizing ground and underground displacement monitoring data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2149 – 2159. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 中华人民共和国国土资源部. 崩塌、滑坡、泥石流监测规范: DZ/T 0221—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Monitoring code of rockfall, landslide and debris flow: DZ/T 0221—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]
- [27] 李海鹏, 陶志刚, 吕谦, 等. 滑坡监测技术方法综述 [C]. 中国矿业科技文汇-2014. 现代矿业杂志社, 2014: 61 – 63. [LI Haipeng, TAO Zhigang, LYU Qian, et al. Review on techniques and methods of landslide monitoring [C]. China Mining Science and Technology Collect-2014. Modern Mining Magazine, 2014: 61 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509 —2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)]
- [29] 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 and Engineering*, 2008, 27(6): 1104 – 1112. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 三峡大学. 三峡库区秭归县地质灾害监测预警工程专业监测年报(2021) [DB]. 宜昌: 三峡大学, 2022. [Three Gorges University. Annual report of geological disaster monitoring and early warning engineering in Zigui County, Three Gorges Reservoir Area [DB]. Yichang: Three Gorges University, 2022. (in Chinese)]
- [31] 湖北省地质环境总站. 宜昌市地质灾害监测预警 2019 年三级专业监测(试点)工程监测季报(2021 年 4-6 月) [DB]. 2021. [Hubei Provincial Geological Environment General Station. Yichang City geological disaster monitoring and early warning 2019 tertiary professional monitoring(Pilot) project monitoring quarterly report(April-June2021) [DB]. 2021. (in Chinese)]
- [32] BORDONI M, VIVALDI V, BONI R, et al. A methodology for the analysis of continuous time-series of automatic inclinometers for slow-moving landslides monitoring in Piemonte region, northern Italy [J]. *Natural Hazards*, 2023, 115(2): 1115 – 1142.
- [33] 三峡大学. 宜昌武陵山片区代表性地质灾害隐患监测预警年报(2022) [DB]. 宜昌: 三峡大学, 2022. [Three Gorges University. Annual report of monitoring and early warning of representative geological hazards in Wuling mountain area of Yichang(2022) [DB]. Yichang: Three Gorges University, 2022. (in Chinese)]