

中文引用格式:叶霄,朱鸿鹄,田坤,等. 应急管理视角下特大型库区滑坡科学观测与早期预警[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(3): 221-231.

英文引用格式:YE Xiao, ZHU Honghu, TIAN Kun, et al. Scientific observation and early warning of extremely large reservoir landslides from perspective of emergency management[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 221-231.

# 应急管理视角下特大型库区滑坡科学观测与早期预警\*

叶霄<sup>1,2</sup>副教授, 朱鸿鹄<sup>\*\*2,3</sup>教授, 田坤<sup>4</sup>高级工程师,

李厚芝<sup>5</sup>高级工程师, 张巍<sup>2</sup>副教授, 程刚<sup>6</sup>副教授

(1 南京信息工程大学 应急管理学院, 江苏 南京 210044; 2 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 3 江苏省大地感知与控灾工程研究中心, 江苏 南京 210023; 4 长江三峡勘测研究院有限公司, 湖北 武汉 430019; 5 中国地质科学院 探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 6 华北科技学院 计算机学院, 河北 廊坊 065201)

中图分类号: X935

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.2006

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金资助(42225702); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505104); 南京信息工程大学人才启动经费资助(2025r064)。

**【摘要】** 为增强极端气候下库区滑坡灾害风险的应对能力, 利用多源监测数据和机器学习算法, 构建一种滑坡多维科学观测和水文气象早期预警的框架。通过分析2个特大型库区滑坡的多年观测数据, 包括 Sentinel-1、全球导航卫星系统(GNSS)地表位移和光纤(FO)应变, 识别滑坡变形的时空格局和主控因素。结合提升决策树(BDT)算法, 提出基于滑带土体实时应变(RTS)的水文气象早期预警方法, 并系统性地探讨极端气候背景下库区滑坡监测预警与应急管理的策略框架。结果表明: 不同变形诱发机制的滑坡表现出不同的时空变形特征, 滑坡活动及其演化与局部抗滑处置措施密切相关; 滑坡变形具有分区独立的特点, 且与极端气象水文条件高度相关; 基于 RTS 的早期预警模型能提供明确的多因子协同预警阈值, 强调应急响应导向的滑坡监测预警理念。

**【关键词】** 应急管理; 库区滑坡; 科学观测; 早期预警; 极端气候

## Scientific observation and early warning of extremely large reservoir landslides from perspective of emergency management

YE Xiao<sup>1,2</sup>, ZHU Honghu<sup>2,3</sup>, TIAN Kun<sup>4</sup>, LI Houzhi<sup>5</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, CHENG Gang<sup>6</sup>

(1 School of Emergency Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China; 2 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210023, China; 3 Jiangsu Engineering Research Center of Earth Sensing and Disaster Control, Nanjing Jiangsu 210023, China; 4 Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei 430019, China; 5 Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Science, Chengdu Sichuan 611734, China; 6 School of Computer Science, North China Institute of Science and Technology, Langfang Hebei 065201, China)

**Abstract:** To enhance the ability to cope with reservoir landslide hazard risks under extreme climate, a framework for multi-dimensional scientific observation and hydrometeorological early warning was

\* 文章编号: 1003-3033(2025)03-0221-11; 收稿日期: 2024-10-15; 修稿日期: 2024-12-18

\*\* 通信作者: 朱鸿鹄(1979—), 男, 江苏苏州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质与岩土工程安全评价、工程地质界面力学性质方面的研究。E-mail: zhh@nju.edu.cn.

constructed using multi-source monitoring data and machine learning algorithms. The spatiotemporal pattern and main controlling factors of landslide deformation were identified by analyzing the multi-annual observations of the two landslide cases, involving Sentinel-1, global navigation satellite system (GNSS) surface displacement and fiber optic (FO) strain. Leveraging the boosting decision tree (BDT) algorithm, a hydrometeorological early warning method based on slip zone real-time strain (RTS) was proposed, and the generalized framework of monitoring, early warning and emergency management strategies for reservoir landslides was systematically discussed. The results indicate that landslides with different deformation mechanisms show different spatiotemporal deformation characteristics, and landslide activities are closely related to localized anti-sliding treatment measures. Landslide kinematics are characterized by subzone-independent displacements and their drivers, which are highly correlated with hydrometeorological extremes. The RTS-based early warning model provides specific hydrometeorological thresholds, emphasizing the emergency response-oriented landslide monitoring and early warning concept.

**Keywords:** emergency management; reservoir landslide; scientific observation; early warning; extreme climate

## 0 引言

山体滑坡是世界上最常见的自然灾害之一,每年都会造成人员伤亡和巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。水库建设和运行对库岸斜坡水文地质环境的再造作用导致大量的滑坡发育或复活,对库区人居环境和可持续发展带来深远的影响<sup>[2-3]</sup>。水库滑坡不仅具有山体滑坡的一般特点,还表现出一定的水力驱动的独特性<sup>[4]</sup>。一旦发生特大型滑坡灾难性坍塌,可能引发滑坡-泥石流-涌浪-滑坡坝-溃决洪水等等级联灾害,将对沿线交通、航运和大坝等重要基础设施及下游城镇安全构成严重威胁<sup>[5]</sup>。近年来,频繁的极端天气事件加剧了库区滑坡活化和致灾的可能,滑坡触发因素呈现出显著的时空变异特征,防灾减灾与风险决策困难升级<sup>[6-7]</sup>。因此,开展特大库区滑坡科学观测及早期预警研究,对应对极端气候背景下库区可持续发展与灾害预警和应急管理具有重要意义。

当前,库区滑坡观测技术手段主要以自动化的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)地表位移和钻孔测斜监测为主。与此同时,基于卫星遥感影像的合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术在区域尺度滑坡识别和地表形变反演方面具有显著的优势。尽管InSAR对地观测结果在一定程度上缓解了GNSS“点式监测”的窘境,然而,这种地表位移观测数据易受人为扰动或失相干的影响而导致变形精度不高,且地表位移无法真实反映地下演化过程<sup>[8]</sup>。传统的滑动式测斜则由于汛期较大的剪切运动而经常失效,无法适应长周期、大量

程的监测背景需求<sup>[9]</sup>。因此,如何构建可持续性目标的智能监测预警框架是库区滑坡防控与管理的关键。

基于地表位移数据的改进切线角法已被广泛用于三峡库区滑坡早期预警实践。通过对经坐标变换处理的斜坡累计位移-时间曲线同量纲化,将其划分为初始变形、匀速变形和加速变形3阶段进而实施分级预警<sup>[10]</sup>。然而,山坡尺度上的地表位移存在空间异质性且易受人为干扰,难以真实地反映滑坡整体变形行为。降雨阈值仍然是主流的滑坡预警策略。如印度尼西亚建立了一个针对全国区域有效降雨阈值的滑坡预警系统<sup>[11]</sup>。然而,这种全国尺度的某一特定降雨阈值可能导致区域内普遍的误报或漏报事件。为此,通过区域再划分的方法,尝试为每个子区域分配不同的降雨阈值<sup>[12-13]</sup>。即便如此,这种多分区的降雨阈值仍未必适用于单体滑坡,且未能考虑库水位波动对滑坡活动性的贡献。

鉴于此,笔者拟立足极端气候防灾减灾,考虑引入前沿的滑坡监测技术,提出构建特大库区滑坡天-空-地-体立体化科学观测框架;选取三峡库区2个具有不同变形触发机制的特大型滑坡案例,通过综合分析多年尺度多源监测数据,探究滑坡活动性及其主控因素的时空演化特征;采用决策树C5.0算法,综合考虑降雨量、降雨强度、库水位和水位升降速率4个影响因子对滑坡滑带土体应变的影响,构建基于提升决策树(Boosting Decision Tree, BDT)算法的滑坡多因子协同预警模型,提出基于地下尺度的滑带土体实时应变(Real-Time Strain, RTS)的水文气象早期预警准则,以期为库区滑坡灾害早期预警和应急管理提供有益信息。

# 1 天-空-地-体立体化科学观测框架

库区缓慢蠕滑的特大型滑坡通常不会直接引起灾难性的人员伤亡事件。然而,由于其潜在的重大致灾影响,因此,对这类滑坡的长期、有效观测至关重要。经过数十年的技术革新和应用实践,发展了以地表位移和深部位移为主要监测指标的多种滑坡监测技术。由于各监测技术具有不同的优势场景及技术局限,目前,业内逐渐形成了联合天-空-地-体多源监测技术的滑坡科学观测体系共识,以提升重大自然灾害防控与应急管理水平和<sup>[8,14]</sup>。

库区滑坡天-空-地-体多维科学观测如图1所示。非接触式的天-空维度对地观测通常具有长时期、大尺度、不受地形位置约束的特点,特别适用于区域尺度滑坡(如变形、地貌特征)时空演化过程的分析。相反,地-体维度的监测技术则大多依赖于传感器与岩土体的接触耦合。通过感知岩土体的多物理力学信息,进而反映滑坡内部复杂的多场演化过程。此外,水文观测站和气象站也是库区滑坡监测的必需元素,用于获取精确的水文(如水位高程、水位升降速率)气象(如降雨、降雨强度)数据。

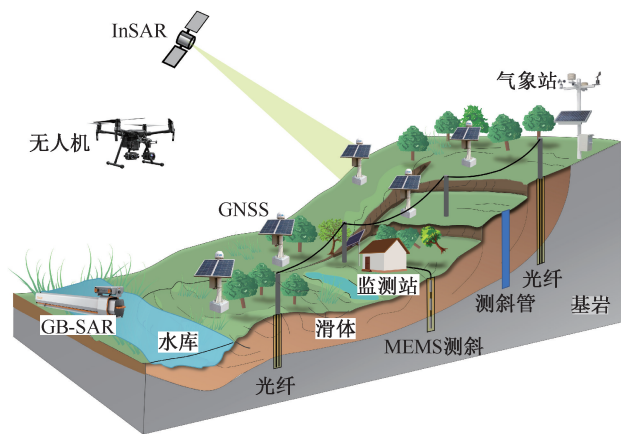


图1 库区滑坡天-空-地-体多维科学观测

Fig. 1 Illustration of sky-space-surface-subsurface scientific observation for reservoir landslides

## 1.1 天-空对地观测

天-空对地观测技术主要指以遥感和近景摄影测量为主的非接触式监测。目前,代表性的卫星遥感技术包括 Landsat、Sentinel、TerraSAR-X、ALOS、高分系列等。这些卫星提供多种不同分辨率、波段和传感器类型的影像数据,用于满足从地球科学研究到国土资源管理及应急响应需求<sup>[15]</sup>。除形变外,多源遥感数据也可协同反演地表温度和土壤含水率等参数。然而,由于 InSAR 技术原理本身的限制,一

些快速移动的滑坡可能未被识别。因而,基于可见光和红外波段技术的高精度光学遥感影像,无人机摄影测绘则提供了较好的补充方案,可对具有失稳风险的斜坡开展精细化的隐患探测。

## 1.2 地表观测

地表观测通常是指利用安装于地表的传感器技术对滑坡浅层土壤参数测量的过程,以地表位移最为典型。目前,GNSS 已基本取代早期的人工拉线测量、水准仪、全站仪等光学测量方法,成为公认的地表位移精确监测技术。通过实时解算地面标志物的三维坐标信息相对变化,获得目标监测点的精确三维位移信息。随着卫星导航和智能传感器技术的发展,涌现出一批新型的地表监测技术,如北斗、微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)等。地面三维激光扫描是另一代表性的地表位移监测技术,利用空间点阵扫描和激光无反射棱镜长距离快速测距,可获取密集的地表位移信息。类似地,地基合成孔径雷达综合了 InSAR 原理与电磁波干涉技术,能够实现小范围区域内毫米级甚至亚毫米级的精确形变监测<sup>[14]</sup>。

## 1.3 地下观测

地下观测通常是指利用钻孔安装传感器获取地下多物理信息的技术。深部位移是地下观测中最典型的指标之一,通常利用竖向钻孔测斜传感器,探测滑带(面)深度以及表征滑坡内部变形行为。实践表明:传统的人工滑动式测斜难以适应自动化和长期监测需求。为此,各种原位测斜的新技术应运而生,如基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)、霍尔元件、MEMS 的测斜传感器<sup>[16]</sup>。这些新型原位测斜传感器一般具有大量程、自动化实时采集、服役期长的优点,空间分辨率通常在 1~10 m。

除深部变形外,涉及斜坡内关键地质界面物态变化的热力学或水文地质学参数也可能为滑坡活动提供重要的前兆信息<sup>[17-18]</sup>。这些界面行为可能帮助解释降水、库水位调度、地下水位波动等对边坡稳定性的贡献机制。光纤已经显示了其在监测地下多场信息方面的潜力,能够生成高时空分辨率的岩土体温度、含水率、孔压、应变等测量数据。此外,时域反射、频域反射技术也可实现温度、含水率、基质吸力等参量的精细化测量,但一般仅适用于浅层土体范围。总体上,这些多物理力学数据集不仅可用于直接表征滑坡动力学演化行为,也可用于多源数据之间相互标定以及统一量纲的对比分析。

## 2 特大滑坡案例研究

### 2.1 研究区概况

三峡库区覆盖重庆大部分地区和湖北省西部,涉及长江干、支流总长度达 1 840 km。数次重大地质构造事件塑造了该区域独特的地貌景观。区内“红层”(指侏罗纪和三叠纪砂岩、泥岩和砂岩与泥岩互层)广泛分布,约占库岸总长度的 72%,是典型的易滑地层<sup>[2]</sup>。这些层状构造为沿江两岸滑坡的普遍发育提供了有利的地质条件。目前已探明滑坡数量 5 000 多座,包括数十座特大型滑坡(体积 $>1 \times 10^7 \text{ m}^3$ )。库水位涨落和降雨是库区滑坡的主要触发因素。降雨主要集中在夏季,年降水量通常为 1 000 mm 左右。自 2010 年 10 月蓄水到 175 m 以来,库水位常年保持在 145~175 m 范围内周期性波动。

选取三峡库区腹地重庆市奉节段藕塘滑坡和新铺滑坡为例(图 2),基于现场调查、钻孔勘探、Sentinel-1 影像、GNSS 位移和光纤应变等多源数据,旨在揭示滑坡运动的时空演化及其主要驱动因素。

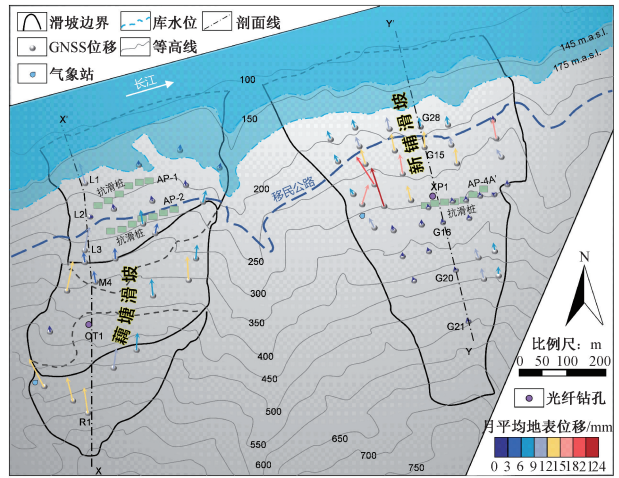
### 2.2 藕塘滑坡

藕塘滑坡位于长江右岸,总面积达 1.77 km<sup>2</sup>,体积超过  $9.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,是三峡库区最大的古滑坡之一。滑坡前、后缘高程约为 90 和 705 m,坡趾延伸进长江,平均坡度约为 25°。根据滑坡的变形历史,从坡趾到坡顶可划分为 3 个子区域,相应的主滑带深度分别约为 61(W11)、46(W12)、25 m(WI3)。滑带土主要灰黑色炭质页岩层组成,厚度为 0.5~3.2 m。基岩产状为  $330 \sim 350^\circ \angle 17 \sim 23^\circ$ 。

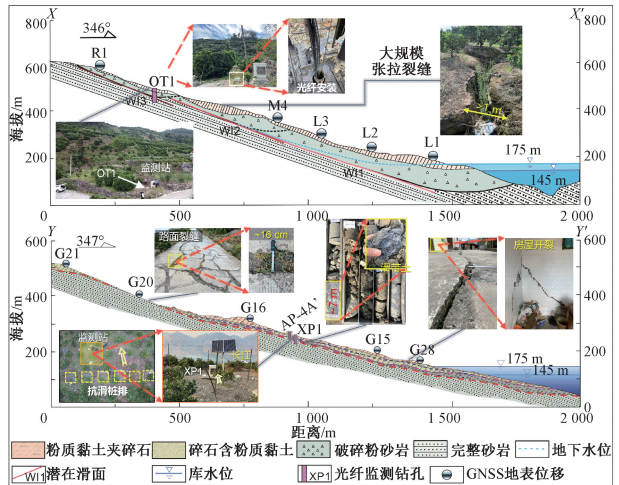
自 2010 年 12 月,先后安装了 25 个 GNSS 监测点。2021 年 2 月,在活跃的滑坡上部布设了高时空分辨率的光纤感测光缆(OT1),监测结果成功识别了主滑带 SZ2(约 20 m 深处,即图 2b 所示 WI3)及新近生成的次级滑带 SZ1(约 10 m 深处)<sup>[7,9]</sup>。总体上,滑坡变形呈现为汛期脉冲式加速的特点,变形大小与降雨和库水位涨落呈一定的关联性。

### 2.3 新铺滑坡

新铺滑坡位于长江右岸,滑坡覆盖面积为 0.86 km<sup>2</sup>,滑坡体积达  $5.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。前、后缘高程分别约为 90 和 705 m,平均坡度为 18~28°。自水库蓄水以来,该滑坡长期以来保持着非常缓慢的变形速率,且未造成较大的生命财产损失。直到 2020 年 5—7 月,连续强降雨诱发了滑坡区内大面积的滑坡加



(a) 滑坡平面图及其监测布设



(b) 滑坡典型剖面图及其监测场地与宏观变形

图 2 特大型库区滑坡案例平、剖面图及其监测布设  
Fig. 2 Extremely large reservoir landslide cases projected on plan and sectional views with field instruments

速变形及局部崩塌,同期最大位移增长超过 550 mm,因而引起了广泛的关注。

滑体自上而下主要由碎石粉质黏土和破碎粉砂岩组成。滑体厚度差异较大,越靠近坡脚越厚。研究表明:新铺滑坡下部为变形最活跃分区,目前以浅层滑移为主,变形程度与库水位升降和/或降雨相关。自 2014 年 7 月,滑坡内先后安装了 41 个 GNSS 监测点和 1 个光纤(XP1)监测钻孔,如图 2a 所示。

## 3 滑坡变形演化特征及其驱动因素

### 3.1 基于多源观测数据的变形时空格局

根据 GNSS 监测数据结果,绘制了滑坡地表位移矢量图,以揭示滑坡变形的时空格局,如图 2a 所示。对于藕塘滑坡,滑坡上部和中部是最活跃的区域,其最大平均位移速率分别为 13.6 和

12.4 mm/月,而滑坡下部区域的平均位移速率普遍不超过4.5 mm/月。分析认为,滑坡下部2013年实施的抗滑措施(AP-1和AP-2)有效地控制了该区域局部的滑移。然而,滑坡中、上部区域在季节性降雨的水力侵蚀作用与滑坡渐进性变形引起大规模张拉裂缝的影响下,变形显著增加。对于新铺滑坡,滑坡下部变形尤其显著,最大平均位移速率达22.3 mm/月。滑坡中、上部则相对稳定,平均位移速率普遍不超过3.0 mm/月。分析认为,滑坡下部实施的抗滑措施(AP-4A')有效限制了桩后滑体向下坡向的变形发展,但桩前滑体变形持续活跃。

为揭示山坡尺度内滑坡变形的时空演化过程及其降雨响应特征,利用2017—2020年期间Sentinel-1影像数据计算获得视线(Line Of Sight, LOS)向位移。图3显示了双月间隔的LOS向增量位移时间

序列。位移正值代表变形靠近卫星/传感器的方向(沿LOS向),反之亦然。由图3可知:藕塘滑坡中、上部和新铺滑坡下部为滑坡变形最活跃的局部区域。变形主要发生在丰水期,特别是5~8月,而枯水期滑坡整体上较为稳定。滑坡变形还呈现出与大量降雨的强相关性。当双月累计降雨量超过400 mm时,活跃分区的变形显著。总体上,InSAR与GNSS位移监测结果所揭示的滑坡变形时空分布基本吻合。

### 3.2 潜在的变形触发因素

为进一步探究滑坡与库水位/降雨诱发因素的相关性,2021—2022年滑坡典型剖面的地表位移和滑带土应变曲线如图4所示。由图4可知:由地表位移和滑带土体应变所表征的滑坡变形行为具有较好的一致性。

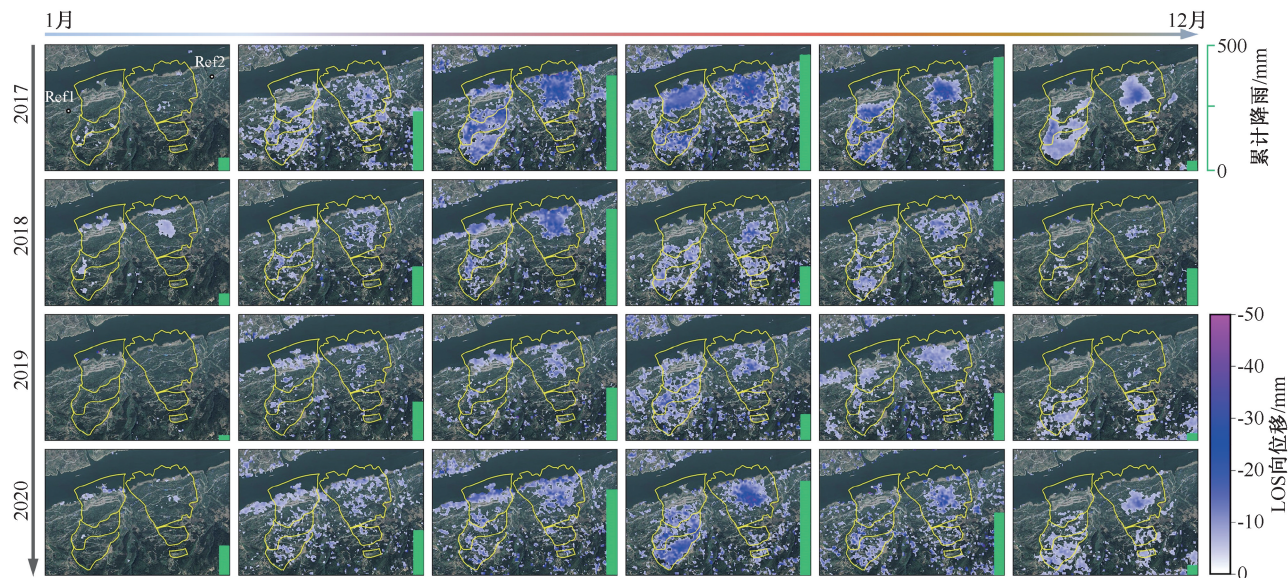


图3 2017—2020年期间滑坡LOS向位移的季节性分布

Fig. 3 Seasonal distribution of LOS displacement of the landslides during 2017–2020

图4a中,对藕塘滑坡而言,降雨主控了整个滑坡变形,特别是2021年7月6日极端降雨事件,引起了地表位移迅速增加,平均位移增长约200 mm。相似地,滑带土体应变速率随该降雨事件迅速响应,如滑带SZ2应变速率高达1 100  $\mu\epsilon/d$ 。分析认为,滑坡渐进性破坏导致中、上部形成的大型张拉裂缝,以及三峡库区独特的台地地貌为大量雨水的快速入渗提供了优势地形条件,加剧了对滑带土体的水力侵蚀和软化效应<sup>[17]</sup>。伴随着不稳定块体的剪切卸荷,岩土体应力状态逐渐达到二次平衡,宏观表现为变形趋于稳定。此外,近岸地表位移(L1和L2)显示了与库水位较大的相关性,表明随着到库岸距离的增加,库水位

对滑坡变形的影响减弱,而降雨的影响增强。

对于新铺滑坡,从剖面图上看,滑坡活动的空间分布以抗滑桩AP-4A'为界,桩后变形(G16、G20和G21)基本稳定,年位移增加最大仅为30.4 mm;桩前靠近库岸的区域(G28和G15)变形则普遍较大,是桩后变形的5.8~54.1倍。针对滑坡变形的触发因素,库水位的控制作用明显强于降雨,且地表位移较滑带土体应变的响应更为敏感。更具体地,地表位移随库水位的连续下降而显著增加,且表现出一定的时间滞后特征。这是由于斜坡内地下水位的下降滞后于库水位下降,而库水位下降引起斜坡土体向外的渗透力使滑坡趋于失稳,滑坡变形机制表现

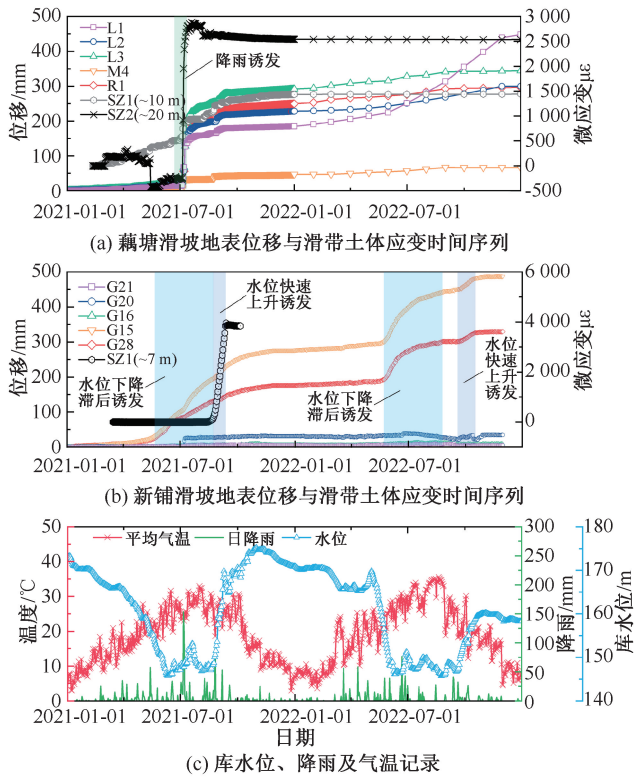


图4 地表、地下变形及水文气象因子

Fig. 4 Surface and subsurface deformation together with hydrometeorological factors

为渗流驱动型<sup>[4]</sup>。此外,水位急剧上升也与滑坡变形强相关,表现为地表位移增长甚至加速增长,滑带土体应变急剧增加。库水位上升引起斜坡内地下水位的抬升(尽管存在一定的时滞效应),软化土体;同时,高库水位引起滑体所受的浮力增加,滑坡变形机制表现为浮力驱动型<sup>[2]</sup>。因此,新铺滑坡变形机制复杂,具有渗流驱动和浮力驱动的混合行为。值得一提的是,图4b中地表位移与滑带土体应变在时间上似乎并不完全协同,这是由于揭露滑带SZ1的钻孔XP1与近库岸的G28和G15的空间差异所致(图2)。钻孔XP1位于陡坎上部,而G28和G15安装在下部更平坦的台地区域。

## 4 基于RTS的滑坡早期预警

### 4.1 BDT模型

采用针对分类问题的决策树C5.0算法,能够有效处理离散的目标变量,通过构建树状模型来预测分类结果<sup>[19]</sup>。C5.0算法适用于大规模数据分析,通过融合自适应提升算法和多个决策树来提高分类准确率。该算法以信息增益(Information Gain, IG)为准则选择最佳分割属性,采用自底向上的剪

枝策略和控制参数防止过拟合,增强模型的泛化能力,并将决策树转化为规则集以便于解释。此外,C5.0算法采用一种动态的贪婪分割策略,没有显式的迭代轮次,而是根据数据的特性动态确定迭代次数,直到满足停止条件<sup>[20]</sup>。决策树C5.0的计算步骤如图5所示。

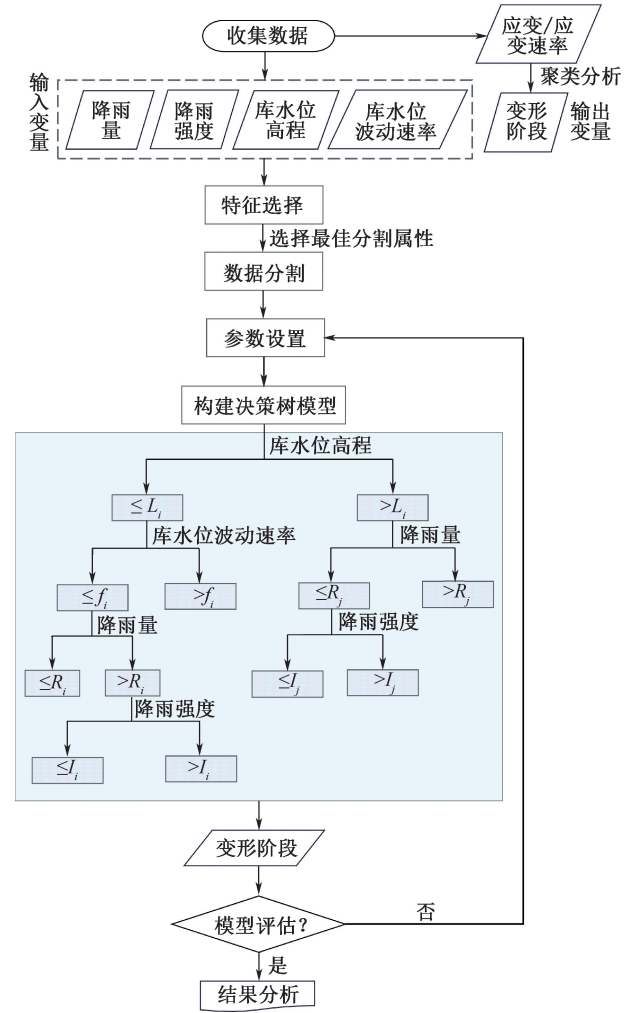


图5 决策树C5.0计算流程

Fig. 5 Flow chart of decision tree C5.0 algorithm

在该算法中,采用熵E来衡量信息的多少,其计算公式为:

$$E(S) = \sum_{i=1}^c -P_i \log_2(P_i) \quad (1)$$

式中: $E(S)$ 为样本集S的熵; $c$ 为种类数; $P_i$ 为该指标中类别*i*对应的概率。

IG指在决策树分类中,使用某个特征分割数据集前后信息熵的差值,衡量某一特征对数据集分类能力的提升程度,即通过该特征分割数据集后,数据集的不确定性(熵)减少了多少。IG越大,说明该特征对于分类的贡献越大,因此,更可能被选作树的节

点进行分割。

$$IG(S|T) = E(S) - \sum_{i \in T} \frac{|S_i|}{S} E(S_i) \quad (2)$$

式中:IG(S|T)为样本集 S 按照属性 T 进行划分而得到的 IG 值;i 为属性 T 的类别;S<sub>i</sub> 为样本属性 T 中 i 类所占的数量;E(S<sub>i</sub>)为属性 T 为 i 类的样本信息熵。

IG 率(Gain Ratio, GR)在决策树算法中用于平衡特征的取值数量对信息增益的影响,从而更公平地评估每个特征的重要性,其计算公式为:

$$GR(S, T) = \frac{IG(S|T)}{E(T)} \quad (3)$$

式中:GR(S, T)为样本集 S 中属性 T 的 GR;E(T)为属性 T 的熵,即:

$$E(T) = - \sum_{i \in T} \frac{|S_i|}{S} \log_2 \left( \frac{|S_i|}{S} \right) \quad (4)$$

当某一属性的取值越多时会被赋予一个惩罚机制。例如:当属性 T 的取值越多,E(T)的纯度就会越低,即 E(T)的值会越大,从而 GR(S, T)的值就会

变小。同时,将没有正确分类的属性分配更高的权重,以便后续训练的模型把它们放到优先地位。

#### 4.2 早期预警框架构建

以日降雨量 R<sub>i</sub>、最大日降雨强度(即最大小时降雨量, I<sub>i</sub>)、库水位高程 L<sub>i</sub> 及其涨落 f<sub>i</sub> 作为模型输入变量,基于滑带土体 RTS 的特征变形类别(Deformation Phase, DP),并将其作为输出变量,构建滑坡早期预警模型,如图 6 所示。所有样本按照 7:3 分为训练集和测试集。模型计算前,必须先将滑坡应变速率根据其演化特征通过聚类分解为多个 DP,并将其作为输出变量(即 DP=I、II 或 III)。这 3 个输出变量相应的日应变速率临界区间为 [50, 200)、[200, +∞) 和 [0, 50), 分别代表近稳态、加速滑移状态和稳态<sup>[17]</sup>。最终,构建的预测模型呈现出一系列“若-则”的语句规则,涉及 DP、多影响因子和特定的阈值。选取 2021 年一个完整水文年的日值数据集进行建模和预测分析,以全面考虑季节性降水和周期性库水位调度对滑坡活动的贡献。

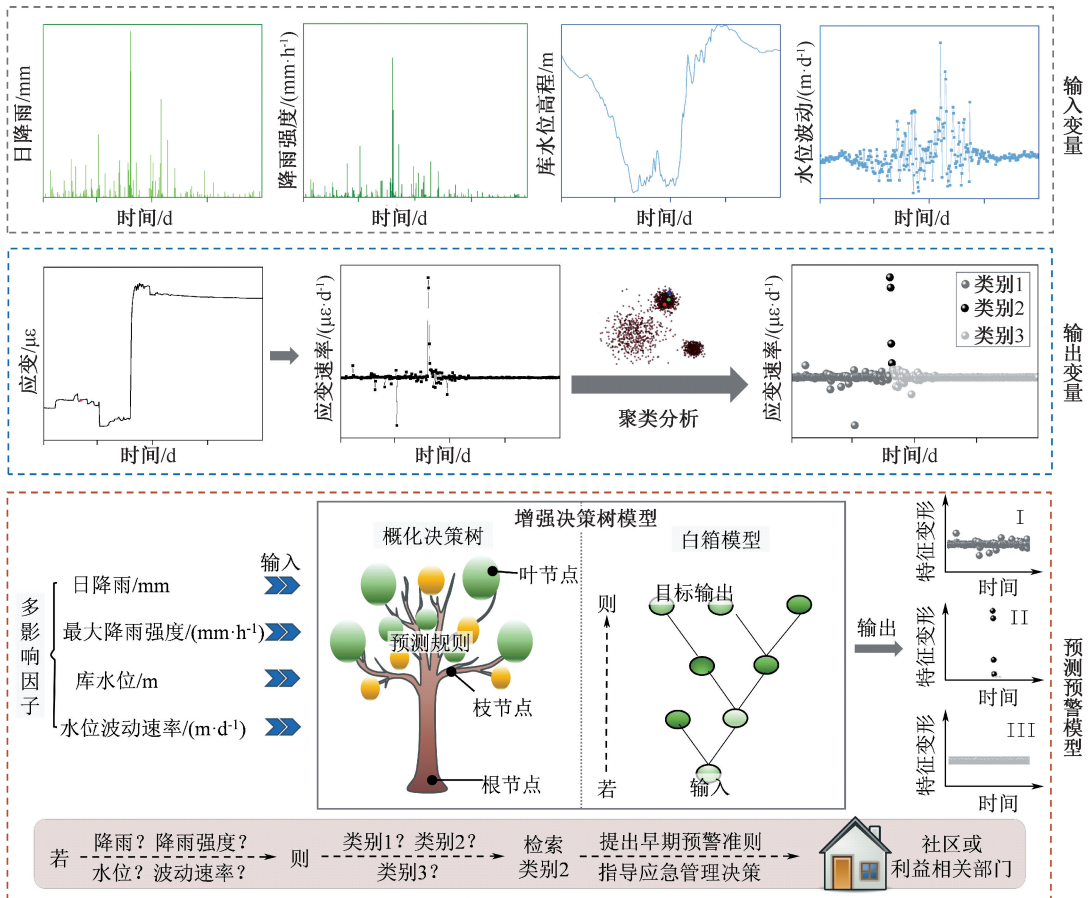


图 6 基于 RTS 的滑坡加速变形早期预警框架

Fig. 6 Framework of RTS-based early warning system for accelerated landslide deformation

### 4.3 水文气象预警规则分析

藕塘滑坡加速变形的临界水文气象条件见表1。结果显示:①当库水位下落速率大于0.88 m/d、水位高程介于146.450~149.505 m,且日降雨量大于57.9 mm时,滑坡发生加速变形的可能性较高,预测精度达90.68%;②当库水位高程低于169.700 m,且最大日降雨强度大于24.4 mm/h或日降雨量大于57.9 mm时,可能引发滑坡加速变形,精度为61.30%~74.27%;③当库水位上涨速率不高于0.14 m/d、水位高程低于150.195 m,且日降雨量大于57.9 mm时,同样也可能引发滑坡加速变形,预测精度>80.34%。

表1 藕塘滑坡水文气象预警准则

Table 1 Hydrometeorological early warning criteria of accelerated deformation of Outang landslide

序号	预测规则	精度/%	含义
1	若 $f_i > -0.880$ m/d & $146.450 < L_i \leq 149.505$ m & $R_i > 57.9$ mm, 则 DP=II	90.68	低水位快速下降+暴雨
2	若 $L_i \leq 169.700$ m & $R_i > 1.8$ mm & $I_i > 24.4$ mm/h, 则 DP=II	70.53	中低水位+强降雨
3	若 $L_i \leq 169.700$ m & $R_i > 1.8$ mm & $I_i > 24.4$ mm/h, 则 DP=II	70.48	中低水位+强降雨
4	若 $L_i \leq 169.700$ m & $I_i > 0.8$ mm/h & $R_i > 57.9$ mm, 则 DP=II	61.30	中低水位+暴雨
5	若 $L_i \leq 169.700$ m & $I_i > 0.8$ mm/h & $I_i > 24.4$ mm/h, 则 DP=II	74.27	中低水位+强降雨
6	若 $f_i \leq 0.140$ m/d & $L_i \leq 150.195$ m & $R_i > 57.9$ mm, 则 DP=II	80.34	低水位+暴雨

综上所述,在中、低水位(即169.700 m以下),尤其是低水位(即150.195 m以下)和极端降雨(即日降雨量大于57.9 mm或最大日降雨强度大于24.4 mm/h)条件下,滑坡加速变形的风险最高。这些临界条件则可作为藕塘滑坡活动的水文气象预警阈值。采用这种多因子协同的预警策略,综合考虑了库水位和降雨对滑坡的共同影响,有效缩短了滑坡地质灾害风险管理的时间窗口。

相似地,新铺滑坡加速变形的临界水文气象条件见表2。结果显示:①当库水位高程介于153.140~166.305 m,且水位上涨速率大于0.375 m/d时,则可能出现滑坡加速,精度为65.5%~86.94%;

②当库水位高程超过166.305 m,且水位上涨速率大于0.230 m/d时,也可能出现滑坡加速,精度达73.86%;③当库水位高程超过166.305 m,且水位下落速率不大于0.445 m/d时,精度为69.10%;④当库水位高程高于166.305 m,且水位上涨速率大于1.850 m/d,同样可能引发滑坡加速变形,精度达86.66%。

表2 新铺滑坡水文气象预警准则

Table 2 Hydrometeorological early warning criteria of accelerated deformation of Xinpu landslide

序号	预测规则	精度/%	含义
1	若 $f_i > 0.375$ m/d & $L_i > 153.140$ m, 则 DP=II	86.94	水位连续上升
2	若 $L_i \leq 166.305$ m & $f_i > 0.375$ m/d, 或 $L_i > 166.305$ m & $f_i > 0.230$ m/d, 则 DP=II	73.86	水位连续上升
3	若 $L_i > 166.305$ m & $f_i \leq -0.445$ m/d, 或 $f_i > -0.445$ m/d & $L_i > 173.910$ m, 则 DP=II	69.10	高水位缓慢下降
4	若 $L_i \leq 164.785$ m & $f_i > 0.375$ m/d, 或 $166.305$ m < $L_i \leq 168.255$ m, 则 DP=II	65.65	水位连续上升或中高水位
5	若 $L_i \leq 166.305$ m & $f_i > 0.375$ m/d, 或 $L_i > 166.305$ m & $R_i > 5.0$ mm, 则 DP=II	72.63	水位上升或高水位
6	若 $153.140$ m < $L_i \leq 166.305$ m & $f_i > 0.375$ m/d, 则 DP=II	83.31	水位连续上升
7	若 $L_i > 166.305$ m & $f_i > 1.850$ m, 则 DP=II	86.66	高水位快速上升

总体而言,新铺滑坡变形的阈值准则主要涉及库水位的涨落。在中、低水位时期,库水位连续上涨且上涨速率大于0.375 m/d,或高库水位时期,库水位连续上涨(大于0.230 m/d)或快速上涨(大于1.850 m/d)或连续下落速率大于0.445 m/d时,最有可能发生滑坡加速。

持续不断的原位监测(如2022年及其后的野外观测结果),能够直接验证表1和表2中阈值准则的有效性<sup>[7]</sup>。研究显示,藕塘滑坡最近20年的变形特征呈现出库水位驱动力减弱而降雨控制作用增强的特征,特别是短时高强的极端降雨。当年降雨量超过1200 mm或月降雨量大于400 mm的湿润年份,滑坡的整体变形程度显著高于干旱年份。同样,新铺滑坡过去10年来的变形特征显示了库水位波动和降雨对滑坡的联合控制作用。近年来,库水位涨落对该滑坡变形行为的影响显著增强。这些阈值准

则不仅与滑坡的历史变形特征相对吻合,而且能够随着持续更新的监测数据进行迭代和校正,从而为汛期灾害风险管理提供更加科学的指导。

## 5 极端气候背景下库区滑坡应急管理

### 5.1 多学科交叉监测预警

库区滑坡涉及复杂的工程地质界面热-水-力相互作用,仅依赖于常规监测的地表位移难以描述滑坡内部演化过程,进而限制了人们对滑坡渐进变形及破坏机制的理解<sup>[17]</sup>。采用多学科交叉的滑坡监测预警方法对提升滑坡科学观测与防控至关重要。这种方法涉及水文地质与工程地质学、地球物理学、气象学、环境生态学、计算机与信息技术等多个领域。利用多尺度多源监测数据,能够定量描述近地表/地下关键工程地质界面的温度、含水率、孔隙水压力、应变等多物理力学特性,也有助于揭示滑坡渐进破坏模式及变形机制。此外,结合人工智能算法模型可进一步预测滑坡的关键指标(如位移、滑带应变、含水率)、滑坡规模和概率。

极端气候模式对滑坡变形的贡献强调了多源监测数据与气象学和信息技术交叉的重要性。研究极端降雨和热浪对滑坡活动的影响是应对增强的极端气候背景下防灾减灾的重要内容。结合高精度的气象预报模型,通过提前预报可能诱发滑坡的极端天气事件,实施不同等级的灾害风险预警和应急策略。此外,通过融合环境科学评估滑坡与生态系统之间的相互影响,包括对水质、土壤和生物多样性等,进而发展生态护坡和制定滑坡后的生态恢复计划,增强自然灾害易发区的区域韧性。

### 5.2 跨部门协作应急管理

针对极端气候背景下三峡库区特大型水库滑坡灾害防御和应对能力的提升需求,以意大利、日本和美国为代表的国际滑坡防控成功经验,为本地化实践提供了重要启示。制定以人为本的有效、实效和高效滑坡灾害应急管理通用策略强调,应结合工程技术和科学管理,以提高社区及利益相关者的应对能力<sup>[21]</sup>。滑坡监测预警系统与应急管理的综合框架如图7所示。通过明确各方在应对滑坡警报时的角色、责任及程序,提高整体应急能力和减灾水平。

1) 建立信息共享机制。以监测预警数据为基础,结合地方志、社区走访和政策制度等信息,建立一个“地学大数据”平台,实现岩土、气象、水利等不同部门间的数据共享和信息交流。①通过工程技

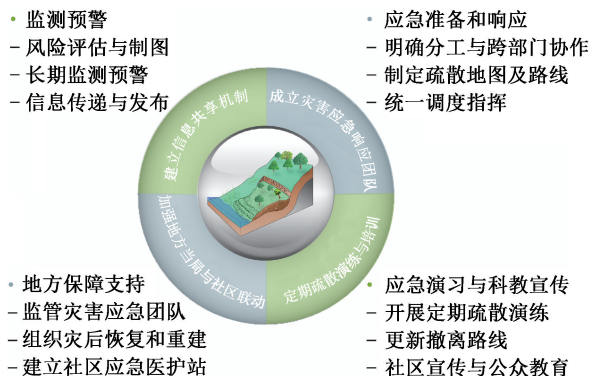


图7 滑坡监测预警系统与应急管理的综合框架

Fig. 7 Systematic framework of landslide monitoring, early warning and emergency management

术、制度及社会经济文化调查,全面评估滑坡易发区的风险,重点关注缓慢蠕滑的特大型滑坡;②分析不稳定斜坡变形的时空格局,选择合适的监测布设位置,建立滑坡早期预警系统,为社区应急响应奠定了基础;③向社区推送滑坡灾害相关信息,以提高其对滑坡特征和风险的理解,同时面向滑坡易发区的常住居民设立地质专员岗,作为群测群防的领头人。

2) 成立灾害应急响应团队。由地方政府决定,选拔具有滑坡识别、防御、应急响应和灾后管理等专业背景和能力的专业人员,成立灾害准备和响应团队,建立突发事件下跨部门协作和集中指挥体系。团队下设一名负责人以及数据与信息部门、难民动员部门、急救部门、后勤部门、安全部门和科教宣传部门等,负责所有滑坡准备和响应的工作,包括制定疏散地图及撤离路线(社区居民也部分参与),以及组织居民灾前紧急撤离、救援和医护人员参与救护等事宜。

3) 定期组织疏散演练与培训。为确保灾害应急的有效响应,团队各部门需参加定向培训计划,相关部门还需定期培训当地社区人员并进行撤离演练,熟悉应急程序和安全撤离路线,增强社区作为第一响应者的能力。此外,团队安全部门还应联合地质专员,定期检查或更新撤离路线。团队宣传部门应定期开展水库地质灾害的社区科普宣传,提升民众防灾减灾意识,增强社区自防自救能力。

4) 加强地方政府与社区联动。通过社区咨询、应急团队服务、地方政府监管的方式,规范监测预警标准和灾害应急响应程序,同时保持实施过程的灵活性。地方政府应建立社区应急医护站,以快速响应小规模灾害事故,同时成立专门的灾后恢复和重建工作小组,为灾区提供及时的援助和支持。

## 6 结 论

1) 从多尺度多元表征的角度构建库区滑坡天-空-地-体科学观测框架,能够支持多源监测数据融合分析,实现滑坡渐进性变形的全过程监测,为揭示滑坡动力学演化过程与触发机理提供关键的数据支撑。

2) 滑坡多源多指标监测有助于深度解译滑坡动态。地表位移对水文气象事件的响应更敏感,但滑带土体应变更能准确反映滑坡的真实变形特性。通过对滑坡多指标的预测预警,确定具体的水文气象阈值,并最终为灾害应急管理提供决策依据。

3) 基于滑带土体 RTS 和 BDT 算法的滑坡预测模型,综合考虑了库水位和降雨的耦合作用,能够实现库区滑坡变形的多因子协同预警,提出可更新的水文气象阈值准则,进而指导汛期滑坡失稳风险

的管控与预警发布。

4) 双案例研究验证了基于 InSAR、GNSS 和 FO 的多源监测数据对于揭示滑坡演化过程的科学性 & 多因子协同预警的有效性。文中 2 种不同变形机制的案例研究结果可能为三峡库区许多其他的滑坡提供有价值的监测预警启示。然而,针对案例中早期预警阈值的长期适用性仍然需要做进一步的深入探究。由于样本数据容量对滑坡预测模型精度的固有影响,未来将考虑纳入更长时间序列的数据集以更新阈值。

## 7 致 谢

特别感谢南京大学施斌教授、大连理工大学裴华富教授和奉节县规划和自然资源局对本研究工作的支持。

## 参 考 文 献

- [1] FROUDE M J, PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016 [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18: 2 161-2 181.
- [2] TANG Huiming, WASOWSKI J, JUANG C H. Geohazards in the Three Gorges Reservoir area, China-Lessons learned from decades of research [J]. *Engineering Geology*, 2019, 261: DOI: 10.1016/j. enggeo. 2019. 105267.
- [3] 刘启源, 刘金程. 自然灾害视角下区域韧性评价方法及影响因素[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(5): 174-181.
- LIU Qiyuan, LIU Jincheng. Regional resilience evaluation methods and influencing factors from perspective of natural disasters [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5): 174-181.
- [4] YIN Yueping, HUANG Bolin, WANG Wenpei, et al. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges project on Yangtze River, China [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8: 577-595.
- [5] AGHAKOUCHAK A, HUNING L S, CHIANG F, et al. How do natural hazards cascade to cause disasters? [J]. *Nature*, 2018, 561(7724): 458-460.
- [6] 朱鸿鹄. 工程地质界面: 从多元表征到演化机理[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(1): 1-20.
- ZHU Honghu. Engineering geological interface: from multivariate characterization to evolution mechanism[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 1-20.
- [7] YE Xiao, ZHU Honghu, WANG Jia, et al. Towards hydrometeorological thresholds of reservoir-induced landslide from subsurface strain observations [J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(6): 1 907-1 922.
- [8] GONG Wenping, ZHANG Shaoyan, JUANG H C, et al. Displacement prediction of landslides at slope-scale: review of physics-based and data-driven approaches [J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 258: DOI: 10.1016/j. earscirev. 2024. 104948.
- [9] LUO Shilin, HUANG Da. Deformation characteristics and reactivation mechanisms of the Outang ancient landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 3 943-3 958.
- [10] 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.
- XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on an improved tangential angle and the corresponding landslide prewarning criteria [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 501-505.
- [11] HIDAYAT R, SUTANTO S J, HIDAYAH A, et al. Development of a landslide early warning system in Indonesia [J]. *Geosciences*, 2019, 9: DOI: 10.3390/geosciences9100451.
- [12] SEGONI S, ROSI A, ROSSI G, et al. Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of

- triggering thresholds for regional-scale warning systems [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14: 2 637–2 648.
- [13] PERUCCACCI S, BRUNETTI M T, GARIANO S L, et al. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy [J]. *Geomorphology*, 2017, 290: 39–57.
- [14] 程刚, 王振雪, 李刚强, 等. 滑坡一体化全维度监测预警技术进展与展望[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 105–114.
- CHENG Gang, WANG Zhenxue, LI Gangqiang, et al. , Progress and prospect of integrated full-dimensional monitoring and early warning technology for landslides [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 105–114.
- [15] 朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR 滑坡监测研究进展[J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2 001–2 019.
- ZHU Jianjun, HU Jun, LI Zhiwei, et al. Recent progress in landslide monitoring with InSAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2 001–2 019.
- [16] PEI Huafu, ZHANG Feng, ZHU Honghu, et al. Development of a distributed three-dimensional inclinometer based on OFDR technology and the Frenet-Serret equations [J]. *Measurement*, 2023, 223: DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113769.
- [17] YE Xiao, ZHU Honghu, WANG Jia, et al. Subsurface multi-physical monitoring of a reservoir landslide with the fiber-optic nerve system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(11): DOI: 10.1029/2022GL098211.
- [18] SEGUÍ C, VEVEAKIS M. Continuous assessment of landslides by measuring their basal temperature [J]. *Landslides*, 2021, 18: 3 953–3 961.
- [19] MA Junwei, TANG Huiming, LIU Xiao, et al. Establishment of a deformation forecasting model for a step-like landslide based on decision tree C5.0 and two-step cluster algorithms: a case study in the Three Gorges reservoir area, China [J]. *Landslides*, 2017, 14: 1 275–1 281.
- [20] TANYU B F, ABBASPOUR A, ALIMOHAMMADLOU Y, et al. Landslide susceptibility analyses using random forest, C4.5, and C5.0 with balanced and unbalanced datasets [J]. *Catena*, 2021, 203: DOI: 10.1016/j.catena.2021.105355.
- [21] FATHANI T F, KARNAWATI D, WILOPO W. An integrated methodology to develop a standard for landslide early warning systems [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16: 2 123–2 135.



**作者简介:** 叶霄 (1993—),男,甘肃平凉人,博士,副教授,主要从事地质灾害智能监测预警与应急管理、极端气候工程地质作用与防灾减灾等方面的研究。E-mail: yexiao@nuist.edu.cn。