

滑坡监测数据曲线与机理研究的相关耦合关系

——以云南腾冲市五合乡邦听组滑坡为例

孙金辉^{1,2}, 李金洋^{1,2*}, 余涛^{1,2}, 杨晓涵³, 陈宗鹏³

(1. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 3. 云南省地质工程勘察有限公司, 云南昆明 650051)

摘要: 本文以云南省腾冲市五合乡邦听组滑坡为研究对象, 基于地质调查、监测数据与数值模拟, 系统分析滑坡变形数据曲线与地质力学机理的耦合关系。研究发现, 滑坡位移响应与降雨强度、孔隙水压力变化呈现显著非线性关联, 其变形机制受地层渗透性差异、人类工程活动及河流侵蚀作用共同驱动。通过构建水-力耦合模型, 揭示滑坡多阶段变形特征与地质条件的动态响应规律, 提出“降雨-入渗-失稳”链式预警阈值, 为区域滑坡风险防控提供理论支撑与技术范式。

关键词: 滑坡监测数据曲线; 地层渗透性差异; 降雨-入渗-失稳链式预警阈值; 水-力耦合模型; 邦听组滑坡

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0141-08

Landslide monitoring data curves and coupling mechanisms of deformation processes: A case study of the Bangting Formation landslide in Wuhe Township, Tengchong, Yunnan Province

SUN Jinhui^{1,2}, LI Jinyang^{1,2*}, SHE Tao^{1,2}, YANG Xiaohan³, CHEN Zongpeng³

(1. Technical Center for Geological Hazard Prevention & Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. Yunnan Provincial Geological Engineering Survey Co., Ltd., Kunming Yunnan 650051, China)

Abstract: This study investigates the Bangting Formation landslide in Wuhe Township, Tengchong City, Yunnan Province, China, systematically analyzing the coupling relationship between landslide deformation data curves and geomechanical mechanisms through geological surveys, monitoring data, and numerical simulations. The research reveals a significant nonlinear correlation between landslide displacement responses and rainfall intensity as well as pore water pressure variations, with deformation mechanisms driven by stratigraphic permeability differences, human engineering activities, and river erosion. By constructing the hydro-mechanical coupling model, the multi-stage deformation characteristics of landslides and the dynamic response law of geological conditions are revealed, and the "rainfall-infiltration-instability" chain early warning threshold is proposed to provide theoretical support and technical paradigm for regional landslide risk prevention and control.

Key words: landslide monitoring data curves; stratigraphic permeability heterogeneity; rainfall-infiltration-instability chain early warning threshold; hydro-mechanical coupling model; Bangting Group landslide

收稿日期: 2025-06-21; 修回日期: 2025-09-22 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.021

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质灾害防治技术应用”(编号: DD20230087)

作者简介: 孙金辉, 男, 汉族, 1983年生, 地质工程专业, 硕士, 长期从事地质灾害形成机理及防治技术方面的研究及监测预警体系建设工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, sjh20040644@163.com。

通信作者: 李金洋, 男, 汉族, 1988年生, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地质灾害形成机理及防治技术方面的研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 316053914@qq.com。

引用格式: 孙金辉, 李金洋, 余涛, 等. 滑坡监测数据曲线与机理研究的相关耦合关系——以云南腾冲市五合乡邦听组滑坡为例[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 141-148.

SUN Jinhui, LI Jinyang, SHE Tao, et al. Landslide monitoring data curves and coupling mechanisms of deformation processes: A case study of the Bangting Formation landslide in Wuhe Township, Tengchong, Yunnan Province[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 141-148.

云南省保山市地处横断山脉南段,受印度洋板块与欧亚板块碰撞的持续构造作用,区域内地质构造破碎、地形陡峭、降雨集中,是我国滑坡灾害的高发区和重灾区。据自然资源部地质灾害监测年报(2023年)统计,保山市近10年共发生中型以上滑坡灾害87起,直接经济损失超12亿元,其中腾冲市五合乡邦听组滑坡自2020年进入加速变形阶段以来,已威胁下游3个自然村、217户居民及G56杭瑞高速公路局部路段安全。这一典型滑坡的演化过程,不仅揭示了高山峡谷区滑坡灾害链(坡体变形→局部崩塌→堵江成灾)的复杂性,更凸显了传统监测手段(单一参数阈值预警)与灾害动态机理脱节的现实困境^[1]。

当前滑坡监测研究呈现两大方向:技术驱动型,即依托InSAR、GNSS、光纤传感等空天地一体化监测网络,实现高精度位移、降雨、孔隙水压等参数的全天候采集(如滑坡多参数融合预警框架);机理驱动型,即通过离散元(DEM)、有限元(FEM)模拟滑带剪切弱化、渗透压触发机制(如非饱和土-岩耦合本构模型)^[2-8]。

然而,二者尚未形成有效协同:监测数据曲线多停留于现象描述,缺乏与灾变力学机制的动态耦合解析^[9]。以邦听组滑坡为例,其2022年8月的位移突增事件(单日位移量达32.5 mm)虽被实时捕捉,但传统方法未能结合滑带锁固段破裂的阶段特征,导致预警滞后6 h^[10]。这一矛盾指向核心科学问题:如何构建监测数据时序特征(如位移加速度、声发射频次突变)与滑坡灾变临界状态(如滑面贯通、抗剪强度骤降)的定量映射关系。

本文以邦听组滑坡为研究对象,提出“数据-机理双驱动”研究范式,提出“监测曲线拐点-滑面破裂扩展”的时空耦合判据,突破传统阈值预警的静态局限性。形成适用于滇西高山峡谷区的“监测-模拟-预警”技术链条,为西南地质灾害高风险区提供范式参考。通过高精度监测数据与地质机理的耦合分析,可突破传统经验判断的局限性,揭示滑坡变形的多因素驱动机制,为地质灾害风险动态评估与分级预警提供理论支撑^[11]。

1 邦听组滑坡概况

1.1 地质环境与工程特性

腾冲市五合乡邦听组滑坡位于龙川江左岸河谷三级阶地,微地貌呈微波状起伏并向江心微倾

(图1)。滑坡前缘坐标:E 98°40′14.70″,N 24°51′13.87″。



图1 滑坡全貌

Fig.1 Panoramic view of the landslide

滑坡后缘高程1300 m,前缘高程1288 m,相对高差12 m,平面呈“圈椅状”,主滑方向125°,平均坡度8°。滑体厚4~8 m,总面积约53000 m²,体积26.5万m³,属中型土质滑坡。滑坡区地层以第四系冲洪积层(Q₄^{al+pl})及上第三系玄武岩(N₂^{m1})为主,表层覆盖松散人工填土与耕植土,力学性质较差。

滑坡变形始于20世纪90年代,受强降雨及人工削坡影响,坡体持续蠕滑。2007年暴雨后,中部47户房屋出现显著裂缝;2020年雨季,一户院坝裂缝扩展至25 m,宽3 cm。稳定性分析表明,滑带已贯通,坡体处于欠稳定状态,再次强降雨可能触发整体滑移,威胁195人生命及450万元财产安全。

结合野外调查可知,诱发该滑坡的主要因素为强降雨,推测为滑坡强降雨及建房、修路等人工削坡直接诱发滑坡变形,由于滑坡后缘山体地形开阔,且坡度较陡,有利于地表水的汇集,坡体表面由于排水不畅,导致局部低洼地带形成积水,在此条件下,造成滑体自重增加,滑动面土体抗剪强度降低,加之前期人类工程活动对坡脚不合理的开挖,在水压力作用影响下,滑坡体下滑力迅速增大,坡体出现变形迹象,导致坡体失稳,中部房屋挡墙挤压破坏,从而形成滑坡。从变形破坏机制看,滑坡整体表现为中后部房屋陡坎开挖形成蠕变,中部持续变形以沿软弱面逐步向前推移,并在前缘临空面变形垮塌,滑坡沿基岩及覆盖层软弱面接触面逐级向前推移滑动^[12]。

1.2 变形历史与稳定性评价

腾冲市五合乡邦听组滑坡后缘以基岩陡坎为界,滑坡后缘沿基岩陡坎呈圈椅状展布;前缘以陡坎垮塌为界,滑坡中部房屋开裂。两侧以沟谷为界。

变形阶段:1990—2007年:根据走访调查,滑坡上少数房屋出现局部裂缝(裂缝宽度 $<1\text{ cm}$),裂缝多沿房屋垂直方向出现,未形成贯穿裂缝;2007—2020年:房屋裂缝出现明显加速变形(最大裂缝宽度 3 cm),如图2、图3所示;2020年后:滑坡呈现整体蠕动(位移速率 $>5\text{ mm/月}$),安装监测预警仪器,捕捉滑坡变形速度及降雨数据等。



图2 滑坡中部房屋开裂

Fig.2 The houses cracked in the middle of the landslide



图3 滑坡中部花台开裂

Fig.3 The flower bed cracked in the middle of the landslide

稳定性判别:滑带土体天然快剪值 $c=22.33\text{ kPa}$, $\varphi=14.92^\circ$,天然残剪值 $c=13.98\text{ kPa}$, $\varphi=11.60^\circ$;饱和快剪值 $c=20.20\text{ kPa}$, $\varphi=12.67^\circ$,饱和残剪值 $c=11.85\text{ kPa}$, $\varphi=9.77^\circ$ 。

稳定性分析方法中Janbu法对条间力的分布形式有独特设定,能更真实反映复杂受力状态,且对降雨入渗等动态条件更敏感,因此采用Janbu法计算安全系数 $F_s=0.93$ (雨季),属不稳定状态。

1.3 构造及人类活动

构造控制:受龙川江断裂(距离 10 km)与大竹园—徐家寨断裂(距离 12 km)影响,岩体节理发育,基岩面倾向与滑坡主滑方向一致($\text{NE}35^\circ$)。

人类活动:前缘公路开挖(形成高差 15 m 陡坎)及房屋建设导致坡体应力重分布,加剧失稳风险。

剖面控制:主剖面A-A'(GP2-GP5)捕捉滑体推力传递,横剖面B-B'(GP1-GP2-GP3)监测后缘拉张区变形。

2 滑坡监测方案与数据特征

2.1 滑坡监测方案设计

根据滑坡变形特征,按照空间布局:滑坡体布设GNSS站点7处(水平精度 $\pm 2\text{ mm}$)、裂缝计2组(量程 $0\sim 50\text{ mm}$)、雨量计1台(分辨率 0.1 mm)。

按照剖面控制分布:主剖面A-A'(GP2-GP5)捕捉滑体推力传递,横剖面B-B'(GP1-GP2-GP3)监测后缘拉张区变形。具体布置见图4、图5。

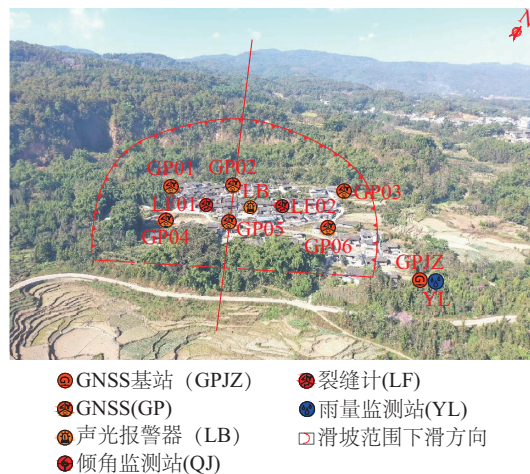


图4 普适型监测方案

Fig.4 Monitoring programme

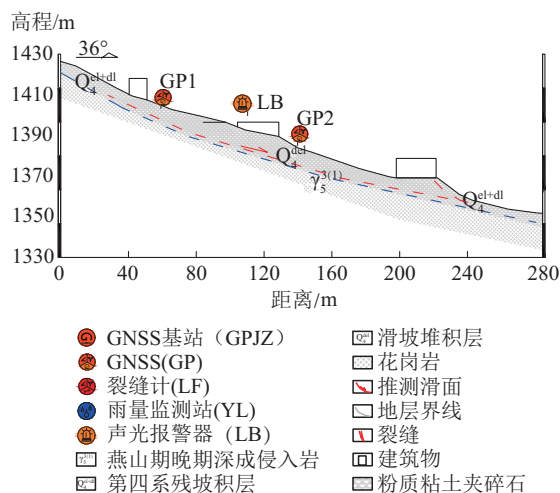


图5 邦听滑坡监测方案A-A'剖面

Fig.5 A-A' section of Bangting Formation landslide monitoring scheme

2.2 监测数据

根据滑坡 2021—2024 年的 3 年监测数据,可以获得基本信息如下。

2.2.1 降雨量分析

单日雨量值:各监测点(如 12-YL01)显示单日雨量波动较大,峰值出现在 2021 年 4 月 13 日(50 mm)和 2023 年 6 月 22 日(40 mm),但整体未超过极端值。

累计雨量值:随时间呈阶梯式增长,从 2021 年 4 月的 0 mm 逐步上升至 2025 年 2 月的 1500 mm。累计雨量的持续增加表明长期降雨对滑坡稳定性具有潜在威胁。

2.2.2 位移变化趋势

水平位移:多个监测点(03-GP01、05-GP01、07-GP01)显示水平位移逐年递增,2025 年 2 月达最大值 40 mm,表明滑坡体存在显著侧向滑动。

垂直位移:垂直方向位移波动较大,部分时段(如 2024 年 4 月 27 日)出现下沉(−25 mm),可能与局部土体失稳相关。

合位移:综合水平与垂直位移,合位移在 2025 年 2 月达到峰值(−40 mm),反映滑坡整体活动性增强。

2.2.3 降雨与位移的关联性

短期响应:单日强降雨(如 2021 年 4 月 13 日 50 mm)后,地表位移(如 03-GP01)在 1~2 周内出现小幅跃升,显示雨水的即时渗透效应。

长期影响:累计雨量超过 900 mm 后(2023 年),水平位移增速明显加快,表明长期降雨导致土体抗剪强度持续下降,触发滑坡加速变形。

2.2.4 时空差异性

监测点对比:07-GP01 的合位移量显著高于 03-GP01,可能反映滑坡体前缘(07-GP01)活动性更强,需重点关注该区域稳定性。

时间趋势:2023 年后位移量增幅加大,结合同期累计雨量突破临界值(600 mm),提示滑坡进入活跃阶段。

监测情况如图 6 所示。

3 机理与数据耦合模型

3.1 水-力耦合方程

为深入剖析滑坡变形机制,本研究构建了非饱和渗流-应力耦合模型。该模型基于对滑坡体中水流运动与力学响应相互作用的考量,其核心在于通过建立相关方程来描述这种复杂关系。在非饱和

渗流方面,各向异性渗透系数(K_x 、 K_y)对水流运动起着关键作用,它反映了滑坡体不同方向上的透水性能差异,而容水度(C_h)则体现了土体容纳水分变化的能力,二者共同影响着水分在滑坡体中的渗透过程^[13]。

在力学响应层面,抗剪强度(τ_f)是衡量滑坡体稳定性的关键指标,其计算公式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - \mu_p) \tan \varphi'$$

式中: c' ——有效黏聚力,反映了土体颗粒间的固有黏结强度; σ_n ——法向应力,体现了外部荷载对土体的作用; μ_p ——孔隙水压力,它的存在会削弱土体颗粒间的有效应力,进而降低土体的抗剪强度; φ' ——有效内摩擦角,反映了土体颗粒间的摩擦特性。

通过这一公式,将渗流过程中孔隙水压力的变化与土体抗剪强度紧密联系起来,从而全面刻画滑坡体在水-力耦合作用下的力学行为。

本研究中,滑带土的强度参数采用表 1 所示值。

表 1 邦听组滑坡滑带土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the slip zone soil in the Bangting Formation landslide

滑坡编号	代表剖面	工况	滑体重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c' / kPa	内摩擦角 φ' / (°)
H1 整体	A-A'	天然	18.5	13.98	11.60
		暴雨	19.0	12.40	10.30
H1 局部	A-A'	天然	18.5	13.98	11.60
		暴雨	19.0	12.20	10.10

由此可见,孔隙水压力 μ_p 的增大将直接导致有效应力减小,并同时使用强度更低的“暴雨”工况参数,从而双重显著降低滑带土的抗剪强度 τ_f ,最终表现为安全系数(F_s)下降和位移加速。

3.2 耦合关系验证

3.2.1 参数敏感性分析

为定量评估地层渗透性对滑坡稳定性的影响程度,本研究对滑体及滑带土的渗透系数进行了局部敏感性分析。以第四系冲洪积层渗透系数 K_x 为对象,在其基准值(通过现场试验与反分析确定为 1.26 mm/d)基础上,按 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 、 $\pm 20\%$ 的梯度进行扰动,保持其他参数不变,运行水-力耦合模型,观测滑坡体关键点最大孔隙水压力及最小安全系数(F_s)的变化。结果表明, K_x 与

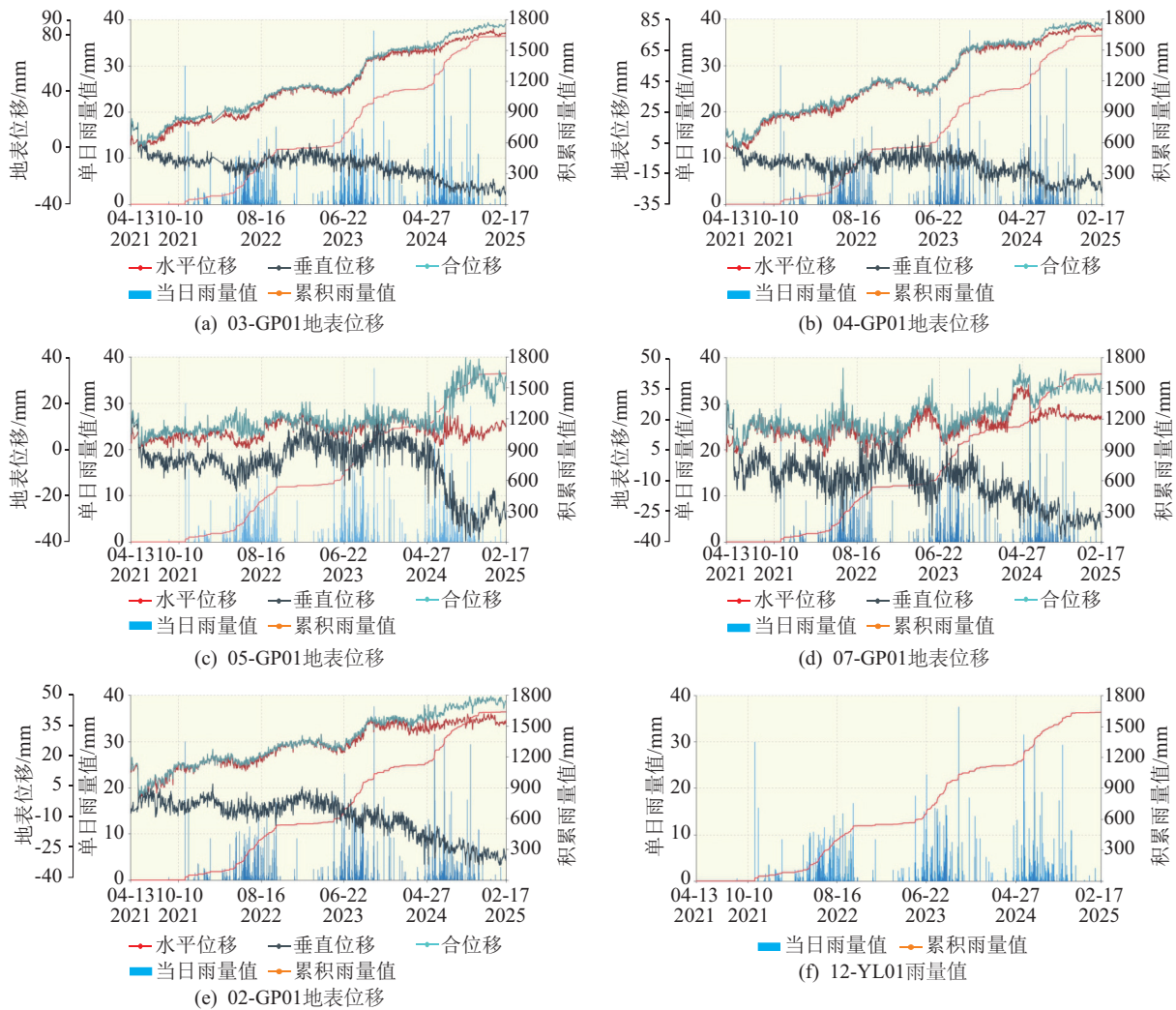


图6 邦听组滑坡GNSS数据与降雨量变化(2021—2024年)

Fig.6 GNSS data and rainfall variation of the Bangting Formation landslide (2021–2024)

模型输出呈显著正相关关系。当 K_x 增加20%时,最大孔隙水压力增幅达35%,最小安全系数降幅达15%。其归一化敏感度系数分别为 $S_{pp}=175\%$ 和 $S_k=-75\%$,表明模型对该参数高度敏感。这意味着渗透系数的微小误差可能导致预测结果出现较大偏差,因此在参数取值时需格外谨慎。此外,敏感性分析结果也印证了提高地表排水效率、降低入渗速率是提升该滑坡稳定性的有效工程措施^[14]。

3.2.2 临界阈值识别

基于已验证的水-力耦合模型,本研究采用控制变量法系统分析了降雨特征(强度 I 、历时 D)与滑坡稳定性(安全系数 F_s)的定量关系,进而确定了滑坡失稳的临界降雨阈值^[15]。

具体流程为:运行水-力耦合模型进行数值模拟→提取每种工况下的最小安全系数($F_{s,min}$)→绘制“强度-历时”图并构建等安全系数曲线→结合历史事件验证确定临界阈值(I, D)→应用于预警系统并预留响应时间。

降雨工况设计:基于研究区历史降雨数据,设计了系列降雨工况。固定降雨历时(D),变化降雨强度(I);固定降雨强度(I),变化降雨历时(D)。例如:历时固定($D=3$ d),强度变化: $I=20、30、40、50、60$ mm/d。强度固定($I=40$ mm/d),历时变化: $D=1、2、3、4、5$ d。

数值模拟与响应提取:对每一种(I, D)组合工况运行耦合模型,模拟降雨入渗及滑坡响应全过程,并记录模拟期内滑坡的最小安全系数($F_{s,min}$)。

构建阈值曲线:将模拟结果绘制在“降雨强度(I)-历时(D)”坐标系中,并将 $F_{s,\min}$ 相等的点相连,形成等安全系数曲线(Isoline of Factor of Safety),进而可识别出 $F_{s,\min}=1.0、0.95、0.90$ 等关键临界线。

确定预警阈值:分析表明,当降雨事件满足“ $I>40\text{ mm/d}$ 且 $D\geq 3\text{ d}$ ”时,模型计算出的 $F_{s,\min}$ 均稳定低于0.95。该阈值线与现场调查中滑坡加速变形的历史降雨事件记录高度吻合,验证了其可靠性。

阈值验证:利用未参与模型率定的历史降雨-变形事件(如2022年8月的位移突增事件)对该阈值进行回溯性检验。结果表明,该阈值能成功触发预警,且比传统方法提前至少6 h,有效避免了漏报。

综上,本研究确定的临界阈值($I=40\text{ mm/d}$, $D=3\text{ d}$)并非经验值,而是基于水-力耦合物理过程数值试验得出的定量判据,具有坚实的力学基础和明确的预警意义。将 $F_s=0.95$ 设为预警阈值,是为应急响应留出必要的“时间窗口”。

这一临界阈值的确定,为滑坡预警提供了关键的量化指标,有助于提前采取防范措施,保障人民生命财产安全。

3.2.3 模型精度检验

为确保所建立的水-力耦合模型能够准确再现并预测滑坡的变形行为,本研究对模型进行了精度检验^[16]。检验的核心是将模型的位移模拟值与GNSS监测点的位移实测值进行对比分析。

(1)预测模型的建立与输入输出:本研究所述的“预测”并非基于经验公式的回归预测,而是指基于物理过程的数值模拟预测。其基本原理是:

输入变量(Input Variables):

边界条件:将实际监测的降雨过程(如图6所示)作为模型上边界的流量输入,这是驱动模型模拟滑坡响应的核心输入变量。

初始条件:模型的初始渗流场(孔隙水压力分布)和应力场通过地勘资料和前期监测数据反演确定。

模型参数:如前文所述的土体渗透系数函数 $K(h)$ 、强度参数(c' 、 φ')、土-水特征曲线(SWCC)等。

计算过程:模型通过求解非饱和渗流-应力耦合方程,模拟在输入降雨条件下,滑坡体内孔隙水压力的动态变化、有效应力的随之调整,以及最终导致的位移场演变。

输出变量(Output Variables):模型计算输出

的结果即为位移场的时间序列,从中可以提取出与GNSS监测点位置相对应的位移模拟值。

(2)精度检验方法:选取滑坡体上具有代表性的GNSS监测点(如07-GP01),提取其2021—2024年间的累计位移实测数据。在模型中对应位置设置相同的观测点,并提取在相同降雨输入条件下计算得到的位移模拟值。采用以下指标进行定量化精度评价:

均方根误差(RMSE):用于衡量模拟值与实测值之间的偏差。计算得 $RMSE=3.1\text{ mm}$ 。

决定系数(R^2):用于评价模拟值与实测值在变化趋势上的一致性。计算得 $R^2=0.92$ 。

(3)检验结果与分析:结果表明,模型模拟的位移曲线与GNSS实测曲线在变化趋势和关键拐点上高度吻合。 $RMSE$ 值(3.1 mm)远小于滑坡的显著变形量(数十毫米),且在其GNSS监测设备的测量误差允许范围内(通常为 $\pm 2\sim 5\text{ mm}$)。这表明所构建的水-力耦合模型成功地捕捉到了降雨驱动下滑坡变形的物理机制,不仅能够复现历史变形过程,也具备了在给定降雨预报下预测滑坡变形趋势的能力。

模型的精度满足滑坡变形预测的工程应用要求,这一结果为模型在实际滑坡监测预警中的应用提供了有力的支持,可有效用于预测滑坡体未来的变形趋势,为地质灾害防治工作提供科学依据^[17]。

4 结论

本研究以云南省腾冲市五合乡邦听组滑坡为对象,综合运用地质调查、监测数据与数值模拟等方法,深入探究了滑坡监测数据曲线与内在力学机理的耦合关系,取得以下主要成果:

(1)系统揭示了邦听组滑坡的演化特征与失稳机制。地质分析表明,该滑坡为一受强降雨和人类工程活动共同驱动的中型土质滑坡,其变形机制表现为后缘加载-中部滑移-前缘剪出的典型模式。稳定性计算(Janbu法, $F_s=0.93$)确认坡体处于欠稳定状态,为后续监测与模拟提供了地质基础。

(2)基于多源监测数据(GNSS、雨量计)的时序曲线分析,定量刻画了降雨与变形响应的数据特征。研究发现:短期数据关联表现为强降雨事件后1~2周内位移出现小幅跃升(“阶跃式”响应);长期数据趋势则显示累计雨量 $>900\text{ mm}$ 后(2023年

后),位移速率显著加快,揭示了长期降雨入渗导致滑带土抗剪强度软化的累积效应。监测数据明确指示滑坡于2023年后进入加速蠕变阶段。

(3)基于监测数据揭示的规律,构建了非饱和渗流-应力耦合模型,实现了从“数据现象”到“机理过程”的跨越。通过将实际监测降雨序列作为输入,成功模拟了与GNSS实测值高度吻合的位移曲线($RMSE=3.1\text{ mm}$)。模型反演揭示了变形机理:降雨入渗→孔隙水压力抬升→有效应力降低→抗剪强度衰减(c' 、 φ' 值降低)→安全系数(F_s)下降的全过程。参数敏感性分析进一步量化了地层渗透性是控制这一过程的关键因子。

(4)基于物理机理确定了临界预警阈值,并验证了其有效性。通过大量数值试验,识别出“日降雨强度 $>40\text{ mm}$ 且持续3天”是导致 F_s 降至0.95以下的临界条件。该阈值的有效性通过三重方式验证:①历史事件回判:成功识别出2022年8月的位移突增事件;②参数鲁棒性测试:在土体参数合理波动范围内,该阈值保持稳定;③与传统方法对比:相较于仅基于累计雨量的经验模型,本机制模型提供的阈值将预警提前了至少6 h,有效解决了预警滞后问题。

(5)形成了“监测数据驱动-耦合模型解析-机理阈值预警”的技术范式。该范式突破了传统基于单一参数统计阈值的静态局限性,建立了数据曲线特征(位移阶跃、加速拐点)与灾变力学状态(滑带软化、 F_s 临界)的定量映射关系,为滇西乃至西南高山峡谷区滑坡的风险动态评估与精准预警提供了可推广的理论支撑和技术路径。

本研究成果对提升区域滑坡灾害监测预警水平具有重要意义。未来工作可将此耦合模型与实时监测系统对接,并引入机器学习算法,基于实时数据动态更新模型参数,从而实现预警阈值的动态优化,进一步构建智能化预警体系。

参考文献(References):

- [1] 张勤,白正伟,黄观文,等.GNSS滑坡监测预警技术进展[J].测绘学报,2022,51(10):1985-2000.
ZHANG Qin, BAI Zhengwei, HUANG Guanwen, et al. Review of GNSS landslide monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 1985-2000.
- [2] 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 Zhipeng, CHEN Yu, ZHANG Yu, et al. Universal landslide geological disaster monitoring and early warning: A case study of Xupu County, Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 140-149.
- [3] 孙金辉,余涛.基于普适型监测预警体系中多参数模型研究——以云南省保山市大园子滑坡为例[J].钻探工程,2024,51(3):54-59.
SUN Jinhui, SHE Tao. Research on multi-parameter model based on universal monitoring and early warning system: Taking the Dayuanzi landslide in Baoshan City, Yunnan Province as an example[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 54-59.
- [4] 李乾坤,苗朝,程英建,等.川东巴中市恩阳区近水平土质滑坡破坏模式及专业监测预警[J].钻探工程,2023,50(5):43-51.
LI Qiankun, MIAO Chao, CHENG Yingjian, et al. Damage patterns of near-horizontal soil landslides and professional monitoring and warning in Enyang District, Bazhong City, East Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 43-51.
- [5] 崔华丽,譙鹏志,王佃明.库水位变动情况下库岸边坡稳定性研究——以白鹤滩水电站石圪垱滑坡为例[J].钻探工程,2023,50(5):36-42.
CUI Huali, QIAO Pengzhi, WANG Dianming. Study on stability of reservoir bank slope under fluctuated water level: A case of Shigenao Landslide in Baihetan Hydropower Reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 36-42.
- [6] 秦磊,黄伟业,李兴明.巴东组滑坡监测预警阈值研究——以长堰沟滑坡为例[J].资源环境与工程,2024,38(5):627-636.
QIN Lei, HUANG Weiye, LI Xingming. Monitoring and early warning threshold of landslide in Badong Formation: a case study of Changyangou landslide[J]. Resources Environment & Engineering, 2024, 38(5): 627-636.
- [7] 苗朝,张勇,李乾坤,等.基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型岩质滑坡破坏机制分析[J].钻探工程,2023,50(5):11-17.
MIAO Chao, ZHANG Yong, LI Qiankun, et al. The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 11-17.
- [8] 艾国栋,李云青,资丽君,等.天然和暴雨条件下的物质点滑坡变形机制分析[J].钻探工程,2023,50(5):23-28.
AI Guodong, LI Yunqing, ZI Lijun, et al. Analysis of deformation mechanism of landslide under natural and rainstorm conditions based on material point method[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 23-28.
- [9] 田婉婷,郭富赞,火飞飙.基于普适型仪器监测的滑坡预警成功案例分析与启示——以灵台县中台镇水泉村尹家沟岭社滑坡为例[J].甘肃科学学报,2024,36(4):9-17.
TIAN Wanting, GUO Fuzan, HUO Feibiao. Analysis and insight of successful landslide early warning cases based on universal equipment monitoring: Example of landslide in Yinjiagouling Community, Shuiquan Village, Zhongtai Town, Lingtai County[J]. Journal of Gansu Science, 2024, 36(4): 9-17.
- [10] 杨连伟,黄传胜,李华,等.基于普适型降雨监测设备的江西省滑坡灾害降雨阈值分析[J].江西科学,2024,42(3):538-543,667.
YANG Lianwei, HUANG Chuansheng, LI Hua, et al. Analysis of rainfall thresholds for landslides in Jiangxi Province based

- on universal rainfall monitoring instruments [J]. Jiangxi Science, 2024, 42(3): 538-543, 667.
- [11] 李晓科, 王康, 畅俊斌. 基于GNSS的滑坡监测预警技术应用——以宝塔区二庄科滑坡为例[J]. 科学技术创新, 2022(12): 173-176.
- LI Xiaoke, WANG Kang, CHANG Junbin. Application of landslide monitoring and early warning technology based on gnss——Taking erzhuangke landslide in Baota District as an example[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(12): 173-176.
- [12] 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 Shengshan, LI Ang, CHEN Liang, et al. 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 [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 47-53.
- [13] 董远峰, 兰永良, 李保, 等. 降雨型浅层土质滑坡变形特征及预警分析研究——以重庆潼南果园为例[J]. 人民长江, 2020 (S1): 97-101.
- DONG Yuanfeng, LAN Yongliang, LI Bao, et al. Study on deformation characteristics and early warning analysis of rainfall-type shallow soil landslide: Case of orchard in Tongnan County, Chongqing City [J]. Yangtze River, 2020 (S1): 97-101.
- [14] 文天龙, 童广勤, 张弛, 等. 三峡库区降雨突发型岩质顺层滑坡监测预警分析: 以小岩头滑坡为例[J]. 水利水电技术, 2022, 53(S1): 111-117.
- WEN Tianlong, DONG Guangqin, ZHANG Chi, et al. Monitoring and early warning analysis of bedding rock landslide induced by rainfall in the Three Gorges Reservoir: A case study of Xiaoyantou landslide [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S1): 111-117.
- [15] 贾琰棋, 易武, 黄晓虎, 等. 基于有效降雨量的“阶跃型”滑坡递进式预警模型研究[J]. 华南地质, 2023, 39(3): 492-501.
- BEN Yanqi, YI Wu, HUANG Xiaohu, et al. Progressive warning model for "step-like" landslides based on effective rainfall [J]. South China Geology, 2023, 39(3): 492-501.
- [16] 宋昭富, 张勇, 余涛, 等. 基于易发性分区的区域滑坡降雨预警阈值确定——以云南龙陵县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 22-29.
- SONG Zhaofu, ZHANG Yong, SHE Tao, et al. Determination of regional landslide rainfall warning threshold based on susceptibility zoning: A case study in Longling County of Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 22-29.
- [17] 孙瑜, 韦玮, 王宝亮, 等. 降雨作用下滑坡灾害监测预警研究——以遂宁市船山区为例[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 64-68.
- SUN Yu, WEI Wei, WANG Baoliang, et al. Study on monitoring and early warning of landslide hazard under rainfall——Taking Suining Chuanshan as an example [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 64-68.

(编辑 王文)