王劼耘,沈徐兵,江志杰,等.滑动力-深部运动耦合的降雨型滑坡预警研究[J].地震工程学报,2027,49(1):61-70.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250728003

Wang Jieyun, Shen Xubing, Jiang Zhijie, et al. Early warning for rainfall-induced landslides based on the coupling between sliding force and deep-seated movement [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49 (1): 61-70. DOI: 10.20000/j. 1000 - 0844.20250728003

滑动力-深部运动耦合的降雨型滑坡预警研究

王劼耘[1,2], 沈徐兵[3], 江志杰[4], 王长永[5], 赵化锐[2]

(1. 平陆运河集团有限公司,广西 南宁 530201; 2. 广西现代运河实验室,广西 南宁 530029;
3. 中交上海航道局有限公司,上海 200002;4. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
5. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司,上海 200120)

摘要: 降雨是诱发边坡失稳的主要因素,建立科学的边坡滑动预警体系对防灾减灾与保障民生具有重要意义。以某运河高边坡工程为例,建立精细化平面应变有限元模型,并结合深部位移监测阵列数据,探讨降雨型滑坡的预警机制,提出目标监测点处滑动力-深部运动耦合的预警阈值确定方法。研究表明,降雨诱发的边坡滑动过程中,应力变化呈现出明显的五阶段演化特征,即初始渗透响应阶段、土体强度衰减阶段、应力重分布阶段、临界破坏阶段和失稳滑动阶段。相较于水平累计位移,水平位移速率与五阶段应力变化特征的相关性更为显著,更适合作为预警参数。滑动力与水平位移速率在前三个阶段保持高度同步,而在临界破坏阶段出现差异,此时水平位移速率曲线呈现“倒V”形特征。将该“倒V”点设定为红色预警阈值,可实现提前预警。基于滑动力-水平位移速率的耦合关系,确定蓝色无警、黄色预警、橙色预警和红色预警四级预警分级,并给出相应的定量化预警阈值。

关键词: 深部位移监测;降雨滑坡预警;数值模拟;滑动力;位移速率

中图分类号: TU43; P642.22 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2027)01-0061-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250728003

Early warning for rainfall-induced landslides based on the coupling between sliding force and deep-seated movement

Wang Jieyun[1,2], Shen Xubing[3], Jiang Zhijie[4], Wang Changyong[5], Zhao Huarui[2]

(*1. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530201, Guangxi, China;*
2. Guangxi Laboratory of Modern Canal, Nanning 530029, Guangxi, China;
3. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China;
4. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;
5. CCCC Shanghai Waterway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Rainfall is the primary factor inducing slope instability. Establishing a scientific slope sliding

收稿日期:2025-07-28

基金项目:甘肃省科技计划资助(青年科技基金)项目(24JRRA1189);广西科技厅项目(桂科 AA23062038)

第一作者简介:王劼耘(1966-),男,云南富民人,正高级工程师,主要从事运河航道及桥梁隧道工程相关研究。E-mail: plyhkjxxb@163.com。

通信作者:江志杰,女,硕士,工程师,从事岩土工程地震场地效应方面的研究。E-mail: m15201530155@163.com。

early warning system is of great importance for disaster prevention, disaster mitigation, and public safety. Taking a high slope canal project as an example, this study establishes a refined plane-strain finite element model and combines it with deep displacement monitoring array data to investigate methods for warning of rainfall-induced landslides. A coupled method for determining warning thresholds based on the sliding forces and deep-seated movements at target monitoring points is proposed. The study reveals that the stress evolution during rainfall-induced slope sliding exhibits five distinct characteristic stages: an initial seepage response stage, a soil strength deterioration stage, a stress redistribution stage, a critical failure stage, and an unstable sliding stage. Compared with horizontal cumulative displacement, the horizontal displacement rate exhibits stronger correlations with the stress variation characteristics of these five stages, and it is therefore more suitable as a warning parameter. The sliding force and horizontal displacement rate are highly consistent in the first three stages, but they diverge in the critical failure stage, where the curve of the horizontal displacement rate exhibits an inverted V pattern. Using the inverted V point as the red warning threshold offers a clear early warning advantage. Based on the coupled relationship between the sliding force and the horizontal displacement rate, a warning classification system was established, ranging from blue (no warning) to yellow, orange, and red warning levels, with quantitative warning thresholds determined accordingly.

Keywords: deep displacement monitoring; rainfall-induced landslide early warning; numerical simulation; sliding force; displacement rate

0 引言

降雨是诱发滑坡的主要因素[1]。近年来,降雨引发滑坡致使交通中断的事件频发,严重威胁人民群众生命财产安全。滑坡预警可显著降低滑坡灾害损失,目前主要的滑坡监测预警参数包括位移与应力两类。

位移监测经历了由表面到深部、由单点到阵列的发展过程。早期主要监测边坡表面位移[2];随着物联网技术兴起,全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)[3]、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)[4]等新型地表位移监测手段逐渐推广应用。然而,地表出现明显位移时边坡通常已接近滑动,因此地表位移不宜单独作为滑坡预警参数。深部位移监测阵列可准确识别滑面位置,直观反映滑面变形,具有空间连续性优势,已广泛用于滑坡监测[5-7]。陈贺等[8-9]分析滑坡形成不同阶段(匀速变形、加速变形、临滑变形)内的深部蠕滑运动数据,发现动能、动能变化率与加速度在不同阶段具有较好辨识度,并据此构建滑动预警体系。郭延辉等[10]针对云南某水电站库区特大型滑坡,改进了基于测斜仪的动能与动能变化率预警指标。然而,累计位移相关参数随降雨呈“指数式”突变增长,作为预警参数仍具滞后性,其应用方法有待进一步探讨。此外,位移速率是辨识滑坡阶段性演化的另一重要运动学指标。Zhou等[11]提出引入可控变量,解决传统倒速度法因滑坡破坏前加速度减小导致预测精度下降的问题,并在多个滑坡案例中验证改进方法的有效性。贲琰棋等[12]优化滑坡位移曲线“突变拐点”和“稳定拐点”及位移速率曲线“减速拐点”的识别方法,提出以累积加速度和改进切线角作为判据的滑坡预警方法。

边坡滑动的内因在于滑坡的“下滑力”大于滑面的“抗滑力”。边坡内部复杂力学平衡状态可由“滑动力”直接表征。滑动力反映与下滑力、抗滑力相关的土体实际应力状态,可作为预测边坡滑动的即时判据,但其监测难度和成本较高。何满潮等[13-14]提出滑坡“牛顿力”测量体系,并研发负泊松比锚索监测滑坡滑动力,试验与工程应用均印证牛顿力作为滑坡预警参数的有效性。陈冠琪等[15]以某预应力加固锚索边坡工程为例,将滑动面开始发育和滑动面贯通时刻作为预警节点,通过数值模拟计算两时刻间锚索内力增量,提出以锚索内力增量比作为滑动预警参数的方法。晏长安等[16]对典型锚杆加固边坡进行数值模拟,计算边坡滑动演变过程中的下滑力增量、抗滑力减量和锚杆轴力,经回归分析确定锚杆轴力预警阈值。

滑动力作为边坡失稳的内在驱动因素，能够反映边坡的力学本质，但其监测技术复杂、成本较高；深部位移作为边坡变形的直观表现，监测技术相对成熟，但单独使用存在滞后性问题。二者各有优劣。鉴于此，本文基于滑动力代表“因”（力学驱动）、深部运动代表“果”（变形响应）的理论耦合关系，以某运河河道方形格构-锚杆加固的高边坡工程为例，依托深部位移阵列监测，开展滑动预警阈值研究；采用数值模拟分析降雨诱发滑动过程中滑动力与深部运动的同步演化规律，揭示致灾机理，提出滑动力-深部运动双参数协同的滑动预警分级与阈值确定方法，为深部位移阵列监测边坡预警系统的工程应用提供理论依据。

1　研究方案

近年来，数值模拟方法在滑坡机理研究中得到广泛应用[17-18]，数值计算中滑面的单元应力可直观表征滑面上的“滑动力”。结合深部位移监测阵列数据，采用数值模拟方法研究边坡滑动机理，通过模拟不同工况下边坡的滑动过程，获取滑动力-深部运动的时空演化特征及其对应关系，并以此评估边坡的稳定性状态，为预警阈值的确定提供科学依据。具体研究方案如图 1 所示，包括以下几个方面：

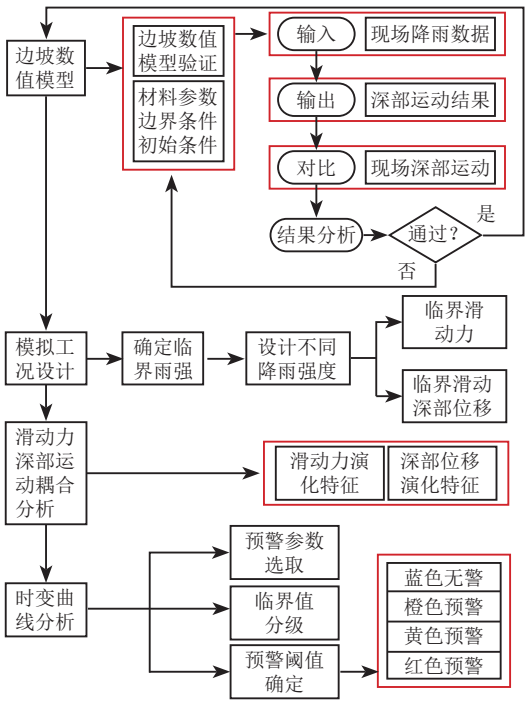


图 1　数值模拟驱动的滑坡预警等级划分研究路线

Fig. 1　Research route of landslide warning level classification driven by numerical simulation

（1）建立边坡数值分析模型，通过与现场监测数据的对比分析，验证模型的合理性和可靠性；

（2）基于工程实际和气象资料，设计不同强度的降雨工况，模拟边坡的滑动灾变过程；

（3）系统分析边坡滑动过程中的力学响应和深部运动特征，明确滑动力-深部运动的耦合关系；

（4）基于滑动力-深部运动耦合变化规律建立分级预警标准，将预警阈值依次对应为蓝色无警、黄色预警、橙色预警和红色预警；

（5）选取预警参数，根据滑动力-深部运动耦合关系确定预警阈值，形成分级预警的决策体系。

依据《建筑边坡工程技术规范（GB 50330—2013）》[19]中边坡稳定性状态的划分标准，并结合国务院办公厅关于印发《国家突发环境事件应急预案》[20]的通知中预警级别的相关内容，将滑坡预警等级划分为：蓝色无警、黄色预警、橙色预警和红色预警，如表 1 所列。

表 1　边坡预警分级划分

Table 1　Classification of slope early-warning grades

参数	类别			
预警级别	蓝色无警	黄色预警	橙色预警	红色预警
边坡稳定性状态	稳定	基本稳定	欠稳定	不稳定

2　数值模型及其验证

2.1　工程概况

本工程为某大型运河开挖项目配套的高边坡治理工程，运河呈东北-西南走向，高边坡位于河道东南侧，如图 2 所示。高边坡高达 40 m，坡长 93.6 m，属长大边坡；坡角约 25°，属中等坡度。边坡稳定性条件差，为顺倾层状永久边坡，存在明显滑坡风险，需进行系统性治理以确保运河工程及周边设施的长期安全。典型钻孔 ZK-1 剖面揭示边坡为叠置型岩土混合结构：上部为厚约 4.0 m 的粉质黏土层；中部为厚约 23.0 m 的强风化粉砂岩；河床地层（钻孔 ZK-2）主要由泥质粉砂岩构成；河床底部为厚约 12.0 m 的砾岩层，可视为基岩面。边坡地下水位线位于强风化粉砂岩层内。高边坡采用分级防护方案：一级边坡位于河道最高水位线（14.3 m）以下；二级边坡采用 C25 混凝土制作的方形格构护坡[纵向断面尺寸为 0.3 m（宽）×0.4 m（高），横纵间距均为 3.0 m]；三～五级边坡均采用长度为 3.0 m、公称直径为 28 mm 的 HRB400 级热轧带肋钢筋制作的锚

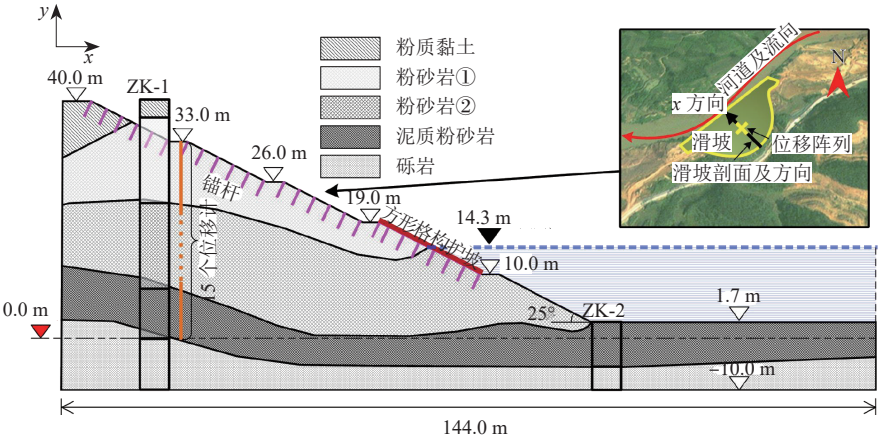


图 2 边坡所在位置及地质概况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of slope location and geological overview

杆加固，横纵间距均为 3.0 m，形成完整的边坡稳定防护体系。四级边坡处布设了深部位移监测阵列，该阵列由 15 个位移计组成，垂直方向以 2 m 间隔递进深度布设，形成系统化的边坡内部变形监测网络。

2.2 数值模型

基于 ABAQUS 有限元软件构建高边坡数值分析模型，采用平面应变模型研究边坡滑动机制[图 3(a)]。边坡模型宽度为 7.0 m(大于两个格构单元的宽度之和，即 2×3.0 m)，通过约束模型的 z 向位移实现平面应变条件，约束模型两侧及基岩底面自由度。土层网格划分尺寸约为 2.0 m[图 3(b)]，为模拟降雨入渗引起的渗流-应力耦合效应，选用 C3D8P 六面体孔隙压力单元。锚杆与方形格构护坡采用 B31 梁单元模拟，网格尺寸约 1.0 m，通过嵌入约束(embedded region)方式实现锚杆、方形格构护坡与土体间的相互作用[图 3(c)]。

降雨时假设水位线以上非饱和土迅速吸水饱和，忽略其脱水性，采用莫尔-库仑模型模拟土体塑性变形，参数列于表 2。土体渗流作用由达西定律描述，渗透系数和孔隙比由室内试验确定(表 2)。非饱和土吸水过程中渗透系数随孔压的变化由式(1)描述，孔压-饱和度关系曲线由式(2)确定。渗透系数及孔压随饱和度变化曲线见图 3(d)。

$$K_w = \frac{a_w K_s}{a_w + [(b_w \times (u_a - u_w)]^{c_w}} \tag{1}$$

式中：K_w 为土体渗透系数；K_s 为土体饱和时的渗透系数；u_a 和 u_w 分别为土体中的气压和水压力，由于坡面与大气相接触，$u_a=0$；a_w、b_w、c_w 均为材料系数，分别取 1 000、0.01 和 1.7。

$$S_r = \frac{S_i + (S_n - S_i)a_s}{a_s + [b_s \times (u_a - u_w)]^{c_s}} \tag{2}$$

式中：S_r 为饱和度；S_i 为残余饱和度(0.08)；S_n 为最大

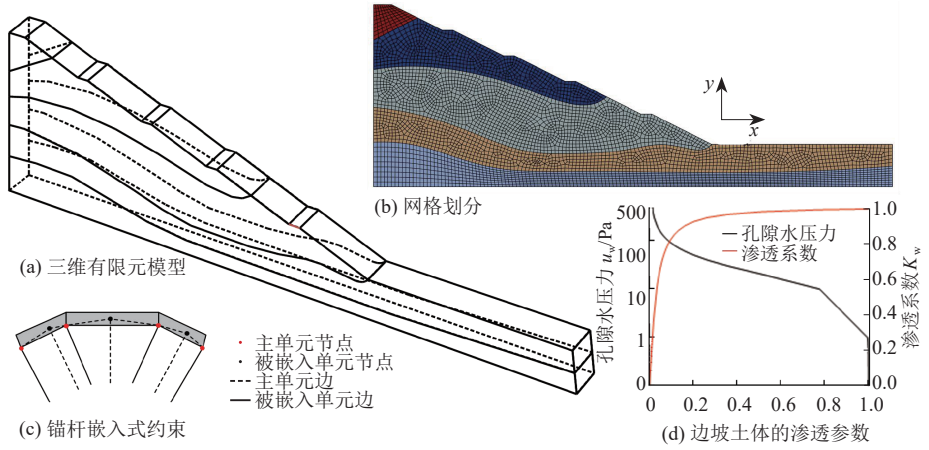


图 3 高边坡的有限元模型信息

Fig. 3 Finite element model information for the high slope

表 2　边坡、护坡及锚杆的材料力学参数

Table 2　Mechanical parameters of slope, slope protection, and anchor bolts

名称	干重度 /(kN/m³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	饱和渗透系数 K_s/(m/s)	a_w	b_w /(kPa^{-1})	c_w	a_s /(kPa^{-1})	b_s	c_s
粉质黏土	1.47	29	0.2	22.71	20	2.3×10^{-6}	1.0	0.35	1.7	0.9	1.0	1.1
强风化粉砂岩①	1.62	120	0.31	23.56	28	4.2×10^{-5}	1.0	0.51	1.3	0.5	1.0	2.3
弱风化粉砂岩①	1.75	500	0.29	61.72	35	6.2×10^{-7}	1.0	0.09	2.7	0.1	1.0	3.1
泥质粉砂岩	1.81	220	0.4	26.72	29	3.4×10^{-6}	1.0	0.92	1.5	1.5	1.0	1.4
砾岩	2.40	300	0.26	0.45	35	-	-	-	-	-	-	-
混凝土	2.45	29×10^3	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
钢筋	7.85	200×10^3	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-

饱和度，取为 1；a_s、b_s、c_s均为材料系数，分别取 1、5×10^{-5}和 3.5。

2.3　模型验证

2024 年 7 月 29 日至 8 月 1 日，高边坡区域日降水量依次为 4.4 mm、15.8 mm、41.6 mm、13.2 mm。图 4(a)和(b)分别给出了滑坡预警深部位移监测阵列记录到的滑坡累计位移和位移速率变化图。可以看出：边坡建成以来，四级边坡地面以下可分为三个深度区间——0～4.0 m(浅层)和 13.0～30.0 m(深层)范围内，边坡向背坡面蠕动；4.0～13.0 m(中层)范围内，边坡向顺坡面蠕动。据此初步判断，滑面位置位于中层。降雨过程中，边坡浅层向背坡面蠕动位移较大，中层向顺坡面蠕动位移较大，深层亦表现为向背坡面蠕动。2024-07-29—2024-08-02 期间记录的边坡位移速率如图 4(b)所示：高边坡每日滑动位移随降雨量增大而增大，滑动区域随时间推移向中浅层上移。数值模拟结果[图 4(c)]与记录结果呈现相同规律，证明建立的数值模型可用于研究高边坡的滑动机制，二者的数值差异可能来源于高边坡复杂的初始应力状态和长期蠕变。

3　边坡滑动预警阈值确定

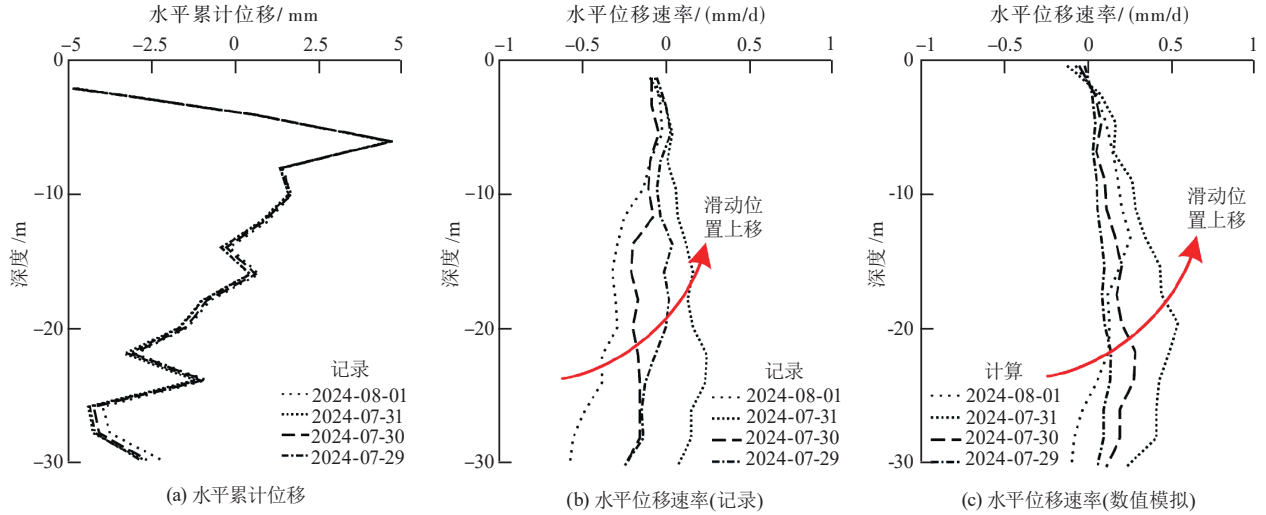
3.1　降雨强度确定

假设长时间强降雨作用下，边坡对雨水的吸收能力达到上限，此时可确定边坡响应的临界降雨强度(简称雨强)。临界雨强 i_c 主要由边坡土的抗渗透系数决定，其计算式为：

$$i_c = K_s \times \cos\beta \times (1 - U_e/U_s) \tag{3}$$

式中：K_s为饱和渗透系数，具体数值列于表 2；β为边坡坡角；U_e为初始体积含水率，U_s为饱和体积含水率。

由现场和室内试验测定并根据经验取值，边坡拟定的临界雨强为 22.0 mm/h。为系统研究不同雨强条件下边坡的响应特征，本研究选取的输入雨强分别为 15.0、17.5、20.0、22.5、25.0 mm/h。



(a) 水平累计位移　(b) 水平位移速率(记录)　(c) 水平位移速率(数值模拟)

图 4　高边坡的深部运动(2024-07-29—2024-08-01)

Fig. 4　Deep-seated movement of high-slope (2024-07-29—2024-08-01)

3.2 边坡滑面的临滑状态

经数值计算分析，边坡在雨强 25.0 mm/h 工况下发生滑坡失稳，计算过程中出现的数值不收敛和边坡位移过大等现象均可作为边坡滑动的有效判据。为深入分析滑面滑动力的演化规律，在滑面关键位置布设三个观测点 A、B、C 进行监测，具体位置如图 5(a)所示。图 5(b)绘制了滑坡发生时刻的应变云图和滑动后的位移云图，数值模拟结果显示滑坡主要发生于三级护坡附近区域。通过对比有锚杆和无锚杆两种工况的计算结果发现，锚杆对滑坡发生区域及其破坏程度均产生显著影响：位移云图[图 5(b)]显示，不设锚杆时滑坡区域较大，延伸至二级护坡中部，滑面完全贯通，整个三级护坡下滑破坏；而设置锚杆后，三级护坡的滑动影响范围明显缩小，且滑面未完全贯通，破坏区域得到有效控制。应变云图还表明：滑坡滑动时刻，锚杆的支护作用显著增强了三级边坡附近土体的整体刚度，约束了土体变形，使得滑面上土体的应变水平明显降低。可见，锚杆支护系统在提高边坡抗滑稳定性方面效果显著。

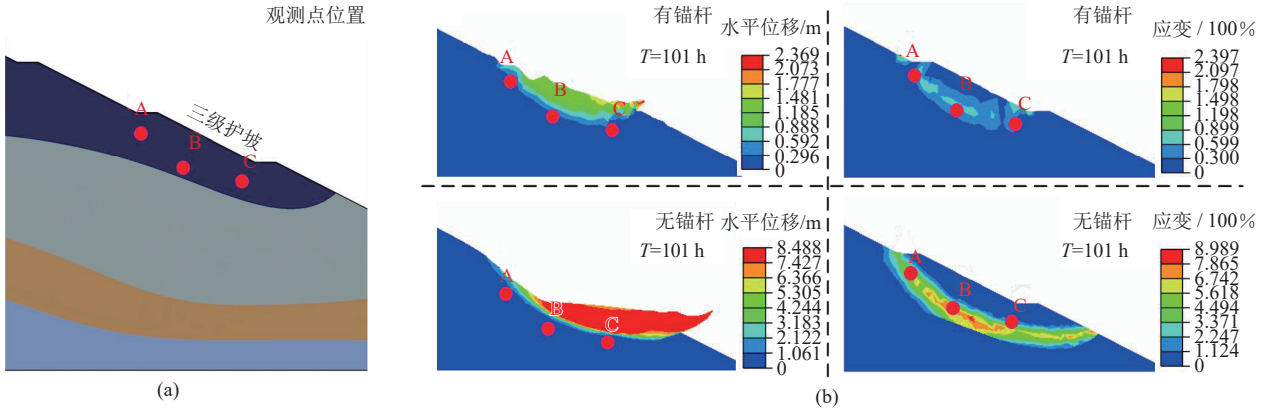


图 5 滑面观测点位置及边坡滑动状态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sliding-surface observation point locations and slope sliding state

边坡滑动的临滑时刻难以确定，主要原因在于缺乏边坡临滑的具体判据。图 6(b)给出了边坡在雨强 25.0 mm/h 工况下滑面观测点的应力时程曲线。以观测点 C 为例，分析降雨诱发滑坡过程中滑面应力的演化规律。无锚杆边坡的滑面应力变化呈现明显的五阶段特征：第一阶段，由于降雨初期雨水主要在表层渗透，孔隙水压力缓慢上升，滑面应力缓慢增长，可称为初始渗透响应阶段；第二阶段，应力增长显著加快并出现第一次突增，推断雨水在该时段内向深部渗透，润湿锋推进至滑面附近导致有效应力显著降低，对应土体强度衰减阶段；第三阶段，应力增长速率在前一阶段基础上稍有下降，可能是滑面附近土体含水率趋于饱和后渗透速率稳定所致，此时边坡应力重新分布；第四阶段，应力再次快速增长并出现第二次突增，此时滑面开始出现局部剪切破坏，破坏区域应力向未破坏区域转移，形成应力集中，此阶段为临界破坏阶段；第五阶段，应力突然下降，滑面全面贯通形成连续滑动通道，边坡失稳滑动。根据“滑坡发生的充分必要条件是牛顿力变化”这一科学依据，第五阶段的应力突降时刻可作为边坡滑动临界时刻的有效判据，无锚杆边坡在降雨 71 h 后发生滑坡。相比之下，设置锚杆后的边坡虽然同样经历五个阶段，但锚杆的主动支护作用显著缓解了第二阶段和第四阶段的应力激增现象，锚杆提供的抗滑力有效增强了边坡整体抗滑能力，使得边坡的失稳时刻延后至 101 h，较无锚杆工况延长 30 h。此外，由于滑面几何形态和局部应力分布差异，滑面不同位置(观测点 A、B、C)的应力变化表现出空间变异性，滑面底部(观测点 C)的应力集中效应明显，五阶段特征更为显著，但总体演化趋势保持一致，说明了五阶段应力演化模式的鲁棒性。

为全面评估不同雨强对高边坡稳定性的影响，开展了一系列数值模拟分析。雨强为 15.0、17.5、20.0、22.5、25.0 mm/h 工况下边坡破坏所需时间如表 3 所列。在较大雨强工况下(20.0～25.0 mm/h)，边坡失稳时间显著缩短：无锚杆时，边坡在雨强 25.0 mm/h 下仅需约 2.9 天即发生滑坡；设置锚杆后，边坡抗滑能力明显提升，25.0 mm/h 雨强下需约 4.2 天才发生滑坡，较无锚杆工况延迟了约 1.3 天，

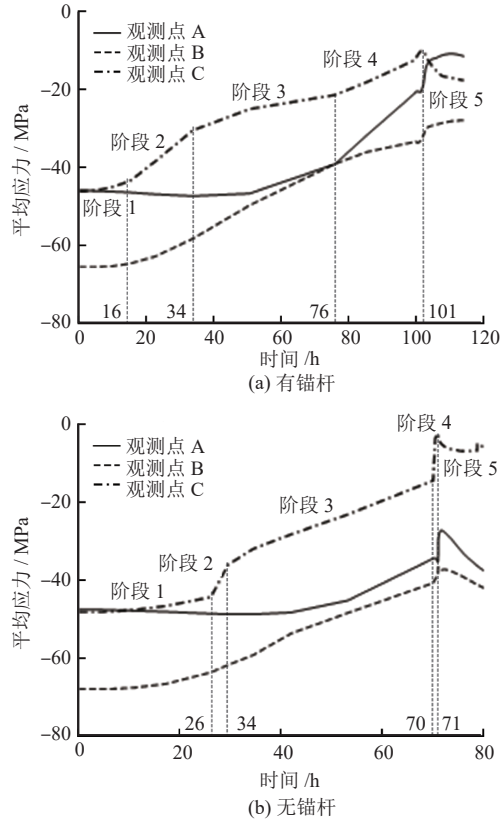


图 6　雨强 25.0 mm/h 工况下各观测点的应力时变曲线

Fig. 6　Stress time-history curves at monitoring points under rainfall intensity of 25.0 mm/h

表 3　雨强及其对应的极限降雨时间

Table 3　Rainfall intensity and corresponding critical rainfall duration

雨强/(mm/h)	极限降雨时间 /h	
	有锚杆	无锚杆
15.0	-	386
17.5	-	170
20.0	341	116
22.5	142	91
25.0	101	71

表明锚杆支护系统在强降雨条件下能提供有效的抗滑保护，但在高强度降雨下应做好滑坡的监测预警工作。较小雨强工况下(15.0～17.5 mm/h)，锚杆的防护效果更为显著：无锚杆时，15.0 mm/h 的较小雨强下，边坡在降雨 386 h(约 16 天)后发生滑坡，可见持续的较弱降雨同样具有致灾风险；而设置锚杆后，15.0 mm/h 和 17.5 mm/h 的雨强均无法导致边坡滑坡，表明锚杆支护系统的防护效果随雨强降低而显著提升。

3.3　深部运动与滑坡的关系

深部位移计阵列垂直于四级马道布设，通过分析深部位移计阵列数据可有效判断滑坡发生位置和变形规律。图 7 绘制了设置锚杆的边坡在不同雨强作用下的水平累计位移分布特征，结果显示距离地表 6 m 深处的观测点 4 是整个监测剖面的水平累计位移峰值点。

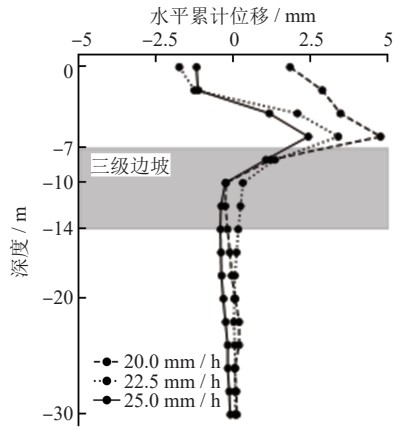


图 7　边坡临滑时刻深部位移监测点处的水平累计位移

Fig. 7　Cumulative horizontal displacement at deep displacement monitoring points at the moment of impending sliding

降雨诱发的边坡滑动受多方面作用控制：(1)降雨入渗产生的渗流力主要作用于滑坡体上部区域，形成向下的拖拽力；(2)雨水增加了土体自重，重力作用的影响主要集中在滑坡体上部；(3)位移计布设位置与滑坡区域存在一定距离，渗流力和重力的影响在传递过程中存在距离衰减效应。因此，距离滑坡区域上部最近的观测点 4 受到的力学作用最为直接和强烈，故选定该观测点为边坡滑动监测的目标监测点。进一步对比不同雨强工况下各观测点的水平累计位移发现：雨强较小的工况在滑坡发生时刻反而具有较大的水平累计位移。这一现象可能源于小雨强引发滑坡时降雨持续时间更长，导致雨水渗透更深更均匀、土体强度弱化程度加剧、有效应力释放更加充分等一系列连锁效应。最终，长期蠕变效应的累积作用超越了短期强降雨的瞬时冲击效应。

3.4　深部运动变化规律

为深入探讨边坡滑动过程中位移演化的内在规律，选取与滑坡失稳相关度较高的关键监测点 3～9，对比分析两种位移表征方式的演化特征，结果如图 8 所示。可见，水平累计位移曲线呈现“指数

型”增长模式，在滑坡发生前，累计位移增长缓慢且较为平稳，但在滑坡发生的临界时刻出现陡增现象。这种演化模式虽然能够识别滑坡发生时刻，但其时序特征变化剧烈、缺乏过渡，难以为多级预警体系的建立提供有效的定量判据。

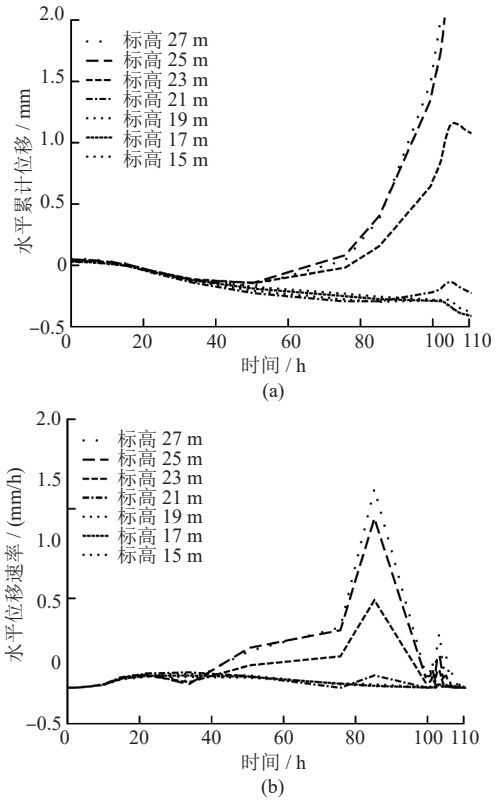


图 8 深部位移监测点的水平位移时程曲线

Fig. 8 Horizontal displacement time-history curves at deep displacement monitoring points

对比而言，水平位移速率曲线展现出与滑面滑动力变化趋势相吻合的渐进演化特征，对应应力发展的五个特征阶段：初始渗透响应阶段、土体强度衰减阶段、应力重分布阶段、临界破坏阶段和失稳滑动阶段。位移速率曲线准确反映了边坡内部力学-变形耦合过程，能够及时捕捉边坡稳定性状态的临界转换信号，为滑坡预警提供了时间窗口和量化基础。因此，位移速率更适宜作为确定定量化多级预警阈值的核心监测参数。

3.5 边坡滑动预警阈值

为深入分析深部运动与滑动面应力之间的耦合关系，将深部位移观测点 4 的累计位移和位移速率曲线，与邻近滑面观测点 A 的应力曲线一同绘制于图 9。结果表明，观测点 4 的位移速率曲线与观测点 A 的应力曲线在演化过程中呈现明显的阶段性耦合特征：第一阶段，初始渗透响应发生，位移速率和应力均缓慢增长，两者保持低水平同步变化；第二阶段，土体强度衰减，随着润湿锋推进至滑面附近，位移速率和应力开始增大；第三阶段，位移速率和应力增长速率趋于稳定，两者继续保持高度同步性，表明边坡内部应力重新达到暂时平衡；然而，进入第四阶段（临界破坏阶段）后，两者出现显著差异——水平位移速率曲线呈现先陡升后陡降的“倒 V”形变化特征，而滑面应力曲线继续上升，位移速率曲线出现峰值转折下降的关键时刻正是滑坡发生时刻。究其原因，当边坡进入临界破坏阶段，滑坡的快速位移发展导致观测点 4 处的初始应力率先释放，直接引起该点后续深部位移增量的减少；与此同时，滑动面上的整体应力仍在继续积累，形成了深部位移与滑面应力响应的时序差异。可见，深部位移时变规律与滑坡发展过程并非完全同步，位移速率具有提前性，能够在滑面应力达到极限状态之前提供预警信号。因此，第四阶段中位移速率曲线的峰值转折点可作为滑坡发生的关键预警阈值点，为滑坡预警系统提供时间余量。

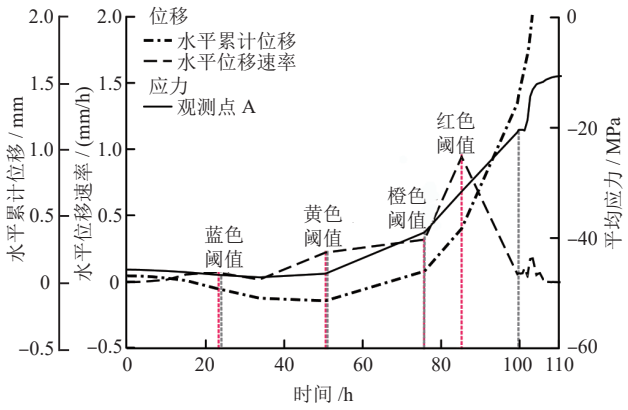


图 9 深部位移观测点 4 的水平累计位移、水平位移速率和应力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of cumulative horizontal displacement, horizontal displacement rate, and stress at deep-displacement observation point 4

基于边坡滑动的滑动力演化机制分析，建立滑动过程与预警分级的对应关系。滑动过程划分为初始渗透响应、土体强度衰减、应力重分布、临界破坏和失稳滑动五阶段，预警等级对应前四个物理阶段，以水平位移速率作为预警等级划分参数，阈值点设为前三个阶段的结束点和第四阶段的峰值转折点。

具体为：①蓝色无警：初始渗透响应阶段，开始

关注边坡稳定；②黄色预警：对应土体强度衰减阶段，边坡稳定性下降，需加强监测；③橙色预警：应力重分布阶段，边坡进入不稳定状态，需采取防护措施；④红色预警：临界破坏阶段，边坡即将失稳，需立即响应。第五阶段失稳滑动超出预警范畴，属于灾害发生阶段。

表 4 给出了不同预警等级对应的位移速率预警阈值及降雨时长，可为边坡滑动预警系统的建立提供具体的技术指标和实施依据。分析不同雨强下的预警阈值变化规律发现：随着雨强减小，各预警等级对应的降雨时长显著延长，位移速率阈值呈现增大趋势，但增幅相对有限。水平位移速率预警阈值具有良好稳定性，与雨强和持续时间的关联度较低，意味着在小雨强条件下，边坡需经历更长的变形过程才能触发预警，因而会产生更大的累计位移，与 3.3 节给出的结果一致。其原因可能在于：小雨强条件下雨水渗流速率减小，边坡变形减缓，应力释放更充分。

表 4　边坡滑动的位移速率预警阈值

Table 4　Early-warning thresholds of displacement rate for slope sliding

雨强 /(mm/h)	蓝色无警		黄色预警		橙色预警		红色预警	
	位移速率 /(mm/h)	降雨时长 /h	位移速率 /(mm/h)	降雨时长 /h	位移速率 /(mm/h)	降雨时长 /h	位移速率 /(mm/h)	降雨时长 /h
20.0	0.11	24.5	0.27	78.7	0.88	110.2	1.14	165.4
22.5	0.06	22.8	0.25	52.6	0.73	73.4	1.02	110.2
25.0	0.04	23.1	0.23	50.9	0.27	76.4	0.97	84.5

4　结论

本文通过数值模拟方法深入研究了降雨型滑坡的致灾过程，明确了滑动力-深部运动的同步变化规律，并基于此探讨了降雨型滑坡的预警机制，得到的主要结论如下：

（1）建立的三维有限元数值模型能够准确模拟降雨条件下边坡的滑动过程，模拟结果与监测数据所呈现的规律一致，验证了模型的可靠性和适用性。

（2）降雨诱发边坡滑动的应力变化过程呈现五阶段演化机制：初始渗透响应、土体强度衰减、应力重分布、临界破坏和失稳滑动。锚杆支护系统显著延长了土体强度衰减阶段和临界破坏阶段，有效延缓了边坡失稳时间；其在小雨强条件下防护效果更为显著。

（3）发现了滑动力与深部运动的耦合规律：前三阶段高度同步，临界破坏阶段出现分化，深部水平位移速率曲线的“倒 V”形特征具有预警超前性，为克服传统位移监测滞后性提供了新途径。

（4）将五个物理阶段与四级预警等级相对应，以水平深部位移速率作为核心预警参数，建立了基于物理机制的预警分级体系。水平位移速率预警阈值稳定性好，受雨强影响较小，为实际工程应用提供了可操作的定量化标准。

参考文献（References）

[1] 彭亮，杜文学，田浩. 西宁市特大滑坡监测预警示范[J]. 科学技术与工程，2021，21(18)：7806-7813.
Peng Liang，Du Wenxue，Tian Hao. Monitoring and early warning demonstration of huge landslide in Xining City[J]. Science Technology and Engineering，2021，21(18)：7806-7813.

[2] 张勇慧，李红旭，盛谦，等. 基于表面位移的公路滑坡监测预警研究[J]. 岩土力学，2010，31(11)：3671-3677.
Zhang Yonghui，Li Hongxu，Sheng Qian，et al. Study of highway landslide monitoring and early warning based on surface displacements[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(11)：3671-3677.

[3] 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.

[4] 蔡嘉伦. 面向滑坡动态监测预警的星地 InSAR 时序建模与解算方法[J]. 测绘学报，2024，53(1)：201.
Cai Jialun. Satellite and ground-based InSAR time series modeling and solution method for landslide dynamic monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2024，53(1)：201.

[5] 薛星桥，金枭豪，王刚，等. 三峡库区塘角村 1 号滑坡变形特征分析[J]. 水文地质工程地质，2010，37(2)：125-129.
Xue Xingqiao，Jin Xiaohao，Wang Gang，et al. An analysis of the deformation characteristics of the No. 1 landslide of Tangjiao Village in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，2010，37(2)：125-129.

[6] 董湘龙，庹先国，王洪辉，等. 滑坡监测预警研究及工程应用

[J]. 金属矿山, 2012(12): 88-90.
Dong Xianglong, Tuo Xianguo, Wang Honghui, et al. Research of landslide monitoring and pre-warning and its engineering application[J]. Metal Mine, 2012(12): 88-90.

[7] 何小亮, 王志硕, 钟建平, 等. 韩城电厂滑坡深部监测及变形分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(3): 119-124.
He Xiaoliang, Wang Zhishuo, Zhong Jianping, et al. Deep ground monitoring and deformation analysis of Hancheng Power Plant landslide[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(3): 119-124.

[8] 陈贺, 汤华, 葛修润, 等. 基于深部位移的蠕滑型滑坡预警指标及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊1): 3015-3024.
Chen He, Tang Hua, Ge Xiurun, et al. Research on early warning indicators and early warning forecast of creep-slip landslides based on deep displacement[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3015-3024.

[9] 陈贺, 李亚军, 房锐, 等. 滑坡深部位移监测新技术及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4063-4070.
Chen He, Li Yajun, Fang Rui, et al. Study on new monitoring technology and early warning and prediction of deep displacement of landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4063-4070.

[10] 郭延辉, 黄友鹏, 张亮, 等. 基于深部位移的滑坡预警预报方法: 以云南某水电站库区特大型滑坡为例[J]. 地质通报, 2025, 44(5): 825-836.
Guo Yanhui, Huang Youpeng, Zhang Liang, et al. Method of landslide early warning and prediction based on deep displacement: a case study of a super large landslide in the reservoir area of a hydropower station in Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(5): 825-836.

[11] Zhou X P, Liu L J, Xu C. A modified inverse-velocity method for predicting the failure time of landslides[J]. Engineering Geology, 2020, 268: 105521.

[12] 贲琰棋, 宋琨, 易武, 等. 基于特征拐点识别的降雨型滑坡中长期预警方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(5): 1273-1285.
Ben Yanqi, Song Kun, Yi Wu, et al. Early and medium term early warning method for rainfall induced landslides based on characteristic inflection point identification[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2025, 33(5): 1273-1285.

[13] 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.
He Manchao. Remote monitoring and forecasting system for landslide geohazards and its engineering applications[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1081-1090.

[14] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2161-2172.
He Manchao, Ren Shulin, Tao Zhigang. Newtonian force remote monitoring and early warning system for landslide geohazards and engineering applications[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2161-2172.

[15] 陈冠琪, 郭昭赢, 张晓温, 等. 基于锚索内力增量比指标的边坡安全性预警研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(3): 145-151, 160.
Chen Guanqi, Guo Zhaoying, Zhang Xiaowen, et al. Research on slope safety warning based on increment ratio of anchor cable internal force[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(3): 145-151, 160.

[16] 晏长根, 孙巍锋, 徐伟, 等. 基于锚杆监测的单滑动面边坡动态预警分析及安全分级[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 188-194, 226.
Yan Changgen, Sun Weifeng, Xu Wei, et al. Dynamic early warning analysis and safety classification of slope with single sliding plane based on monitoring of fully grouted bolts[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 188-194, 226.

[17] 丁保艳, 翟向华, 张卫雄, 等. 大型高位堆积体滑坡稳定性分析与数值模拟[J]. 地震工程学报, 2022, 44(4): 786-793, 802.
Ding Baoyan, Zhai Xianghua, Zhang Weixiong, et al. Analysis and numerical simulation of the stability of large high-position accumulation landslides[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(4): 786-793, 802.

[18] 王海明, 朱殿之, 丁玉涛, 等. 强降雨作用下黄土-泥岩接触面滑坡模型试验及稳定性研究[J]. 地震工程学报, 2025, 47(2): 361-369, 392.
Wang Haiming, Zhu Dianzhi, Ding Yutao, et al. Model tests and stability analysis of loess-mudstone interface landslides under heavy rainfall[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(2): 361-369, 392.

[19] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330—2013 Technical code for building slope engineering[S].

[20] 国务院办公厅. 国家突发环境事件应急预案: 国办函119号[Z]. 2014.
General Office of the State Council. Notice on issuing the national emergency response plan for environmental emergencies: GOSC letter No. 119[Z]. 2014.

(本文编辑:张向红)