第 72 卷 第 5 期
2026 年 10 月

武汉大学学报(理学版)
J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)

Vol. 72 No. 5
Oct. 2026, 638~650

DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0222

降雨-库水位变动作用下阶跃型滑坡变形机制与位移预测

左清军[1,2],肖赛明[1,2],彭卓锐[1,2,3],汪　标[1,2†],易庆林[1,2],刘艺梁[1,2],邓茂林[1,2]

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 土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002;
3. 湖北省地质灾害防治中心,湖北 武汉 430030

收稿日期: 2025-11-24
† 通信联系人 E-mail: Wangbiao09100710@163.com
基金项目:国家自然科学基金项目(42577221,42172303);中国工程院院地合作项目(HB2025B06)
第一作者:左清军,男,教授,现从事岩土体工程性质及灾变防控研究。E-mail:qjzuo@ctgu.edu.cn

摘　要: 针对阶跃型滑坡在降雨与库水位变动共同作用下变形机制不明确、位移预测精度不足的问题,以香溪河右岸白家包滑坡为研究对象,采用地质调查、多源监测与数值模拟等方法,系统分析了滑坡变形演化机制,构建了基于位移导向的变分模态分解(VMD)、改进蜣螂优化算法(IDBO)和长短期记忆网络(LSTM)的混合预测模型VMD-IDBO-LSTM。研究结果表明:1)库水位下降速率与低渗滑带渗流响应速率不匹配,导致滑带内孔隙水压力增大,是诱发阶跃型位移的主要原因;2)降雨对滑坡变形的影响相对较弱,主要表现为对滑坡后缘变形的叠加效应;3)库水位波动通过改变坡体渗流场,使滑坡稳定性呈现“增强-趋稳-减弱”的阶段性变化特征;4)基于白家包滑坡位移数据构建的VMD-IDBO-LSTM模型,预测精度显著优于VMD-LSTM和VMD-DBO-LSTM模型,均方根误差(RMSE)为8.894 mm,相关系数(R^2)为0.983,能有效预测库区阶跃型滑坡。

关　键　词: 阶跃型滑坡;白家包滑坡;库水位变动;变形机制;位移预测

中图分类号: P642.22　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-8836(2026)05-0638-13

Deformation Mechanism and Displacement Prediction of Step-Like Landslides Under Rainfall-Reservoir Water Level Fluctuation

ZUO Qingjun[1,2], XIAO Saiming[1,2], PENG Zhuorui[1,2,3], WANG Biao[1,2†], YI Qinglin[1,2], LIU Yiliang[1,2], DENG Maolin[1,2]

1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;
3. Hubei Provincial Geological Disaster Prevention and Control Center, Wuhan 430030, Hubei, China

Abstract: To address the unclear deformation mechanisms and insufficient displacement prediction accuracy of step-like landslides under the combined influence of rainfall and reservoir water level fluctuations, this study focuses on Baijiabao landslide on the right bank of the Xiangxi River. Through geological surveys, multi-source monitoring, and numerical simulations, the deformation evolution mechanisms of the landslide were systematically analyzed, and a displacement-oriented hybrid prediction model was developed based on Variational Mode Decomposition (VMD), Improved Dung Beetle Optimization (IDBO), and Long Short-Term Memory (LSTM). The research results indicate that: 1) The mismatch between the reservoir water level decline rate and the seepage response rate of the low-permeability sliding mass leads to increased excess pore water pressure within the slip zone, which is the main cause of triggering step-like displacement; 2) The influence of rainfall on landslide deformation is relatively weak, mainly manifested as a superimposed

引用格式:左清军,肖赛明,彭卓锐,等. 降雨-库水位变动作用下阶跃型滑坡变形机制与位移预测[J]. 武汉大学学报(理学版),2026,72(5):638-650. DOI:10.14188/j.1671-8836.2025.0222.

ZUO Qingjun, XIAO Saiming, PENG Zhuorui, *et al*. Deformation Mechanism and Displacement Prediction of Step-Like Landslides Under Rainfall-Reservoir Water Level Fluctuation [J]. *J Wuhan Univ (Nat Sci Ed)*, 2026, 72(5): 638-650. DOI: 10.14188/j.1671-8836.2025.0222(Ch).

effect on deformation at the rear edge of the landslide; 3) Reservoir water level fluctuations alter the seepage field in the slope, resulting in a staged variation characteristic of "enhancement-stabilization-weakening" in landslide stability; 4) The hybrid model (VMD-IDBO-LSTM) constructed based on displacement data of Baijiabao landslide demonstrates significantly better prediction accuracy than comparative models (VMD-LSTM and VMD-DBO-LSTM), with a root mean square error (RMSE) of 8.894 mm and a correlation coefficient (R^2) of 0.983, effectively predicting step-like landslides in the reservoir area.

Key words: step-like landslide; Baijiabao landslide; reservoir water level fluctuation; deformation mechanism; displacement prediction

0　引　言

滑坡是一种频发且危害严重的地质灾害,其防治工作已成为我国及全球防灾减灾体系的重要环节。受季节性降雨和库水位(reservoir water level, RWL)调度的共同作用,库区岸坡岩土体长期遭受水位波动引起的渗透压力作用,导致滑坡地质灾害频发[1-3]。库区内广泛分布的阶跃型滑坡具有独特的位移-时间曲线特征,表现为明显的"平缓蠕变-急剧跃升-逐渐稳定"的阶跃型变化。这类滑坡主要发育于陡峭峡谷地带或古滑坡堆积体区域,其地质特征表现为结构松散且透水性差异显著。此外,这类滑坡对外界水动力因子的响应呈现出明显的非线性和突发性特征[4-5]。准确掌握其变形机制并建立有效预测模型,是防控此类灾害的关键。阶跃型滑坡的变形特征与其形成机制密切相关。相关研究表明,这类滑坡的位移变化具有显著的周期性,尤其在水文因素的影响下,滑坡表现出稳定与急剧变形交替的特征。谭银龙等[6]、袁旭凯等[7]分别采用数值模拟和综合勘查方法,系统研究了三峡库区金鸡岭和白杨湾滑坡的渗流-位移响应特征,以及多级滑面结构受地形、构造和外界扰动控制的变形机制。尚敏等[8]研究发现,三峡库区黑石板滑坡在不同水位阶段的变形特征存在差异,且降水对滑坡变形的影响与水位波动密切相关。关于阶跃型滑坡的形成机制,李麟玮等[9]指出,库水位急剧变化与强降雨的共同作用是阶跃型变形的主要原因。对比发现,降水和库水位波动是影响滑坡变形的关键因素[10-11]。现有研究表明,滑带土的低渗透性会导致库水位下降过程中坡体内外水头差滞后消散,是诱发滑坡突变失稳的内在机制[12-13]。

滑坡位移预测方法主要分为数理统计模型和人工智能模型两大类[14-16]。早期采用的统计模型(如Verhulst模型)和自回归分布滞后模型等虽然提高了计算效率,但在处理复杂非线性关系时预测精度有限[17-18]。近年来,得益于强大的非线性映射能力,机器学习算法在该领域得到广泛应用。Zhou等[19]和Liu等[20]分别提出物理同化时序和框架深度学习模型,显著提升了预测准确性。然而,阶跃型滑坡位移序列包含显著的非平稳突变分量,单一模型往往难以同时捕捉长期平稳趋势和短期剧烈波动,易导致阶跃点预测滞后或峰值预测偏差等问题[21]。为解决这一问题,时频信号分解技术被引入,用于构建"分解-重构-集成"的综合预测模型,以处理多尺度特征提取的挑战[22-23]。然而,现有综合模型缺乏明确的物理指导意义,例如模态分解层数的选择多基于经验或试错法,未能充分考虑滑坡变形对数据处理过程的物理约束,导致模型可解释性不足且泛化能力有限[24]。综上所述,现有预测模型主要存在以下不足:1)缺乏对弱透水-滞后型滑体库水位骤降条件下孔隙水压力时空演化规律的定量表征;2)难以有效识别非平稳序列中的突变特征。

位于香溪河右岸的白家包滑坡具有独特的二元结构特征:上部为松散堆积体,下部为低渗透性滑带。这种结构使其表现出典型的弱透水-滞后型变形特征,成为研究动水压力滞后效应与位移突变关系的理想案例。本文以白家包滑坡为研究对象,围绕其阶跃型变形机制与位移预测问题,从物理机制解析和数据驱动预测两个维度开展综合研究。主要创新点包括:在机制研究方面,基于数值模拟方法定量描述库水位下降与滑体响应速率不匹配所导致的阶跃型孔隙水压力动态演化过程,阐明动水压力滞后效应驱动机制;在方法创新方面,以白家包滑坡位移监测数据为基础,突破传统模型限制,构建融合变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)、改进蜣螂优化算法(Improved Dung Beetle Optimization, IDBO)与长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)的VMD-IDBO-LSTM混合预测模型。该模型通过VMD对非线性突变位移序列进行有效分解,并利用IDBO优化LSTM参数,显著提高了阶跃型滑坡位移预测精度,为滑坡预警提供技术支撑。

1 模型构建

1.1 研究区域

研究区域位于香溪河右岸的白家包滑坡(110°45′29.16″E,30°58′59.52″N),距香溪河与长江交汇处约 2.5 km,距三峡枢纽约 41.2 km,其中部有县级公路穿过。自 2003 年三峡大坝蓄水以来,库水位呈周期性波动,并与季节性降雨共同作用,导致库岸岩土体长期承受交替渗透压力,同时改变库岸边坡的应力状态和渗流场边界条件。受长江水系深切割影响,白家包滑坡区域呈现出峡谷与零散河谷阶地相间的地貌特征,地形高差大,地质条件复杂。

白家包滑坡属于逆向古滑坡,其纵剖面呈靠椅状(图 1),中部相对平缓,后段较陡。消落带位于坡面陡缓交界处。滑面在前、中、后段的倾角分别为 5°、9°~17°和 30°~49°。滑体主要由灰黄-褐黄色粉质黏土、风化砂岩及泥岩块碎石组成,整体强度较低且具有显著的非均质性。滑带为可塑-软塑的含角砾粉质黏土,厚度为 0.2~5.0 m,渗透性极低,易形成软弱剪切带。滑床由紫红色长石石英砂岩与泥岩互层构成,岩层产状约为 260°,倾角约为 25°,属逆向坡组合。上述结构和介质特征决定了白家包滑坡具有弱透水-滞后型的渗流响应特征,并控制了其在外部水动力扰动下的变形破坏模式。

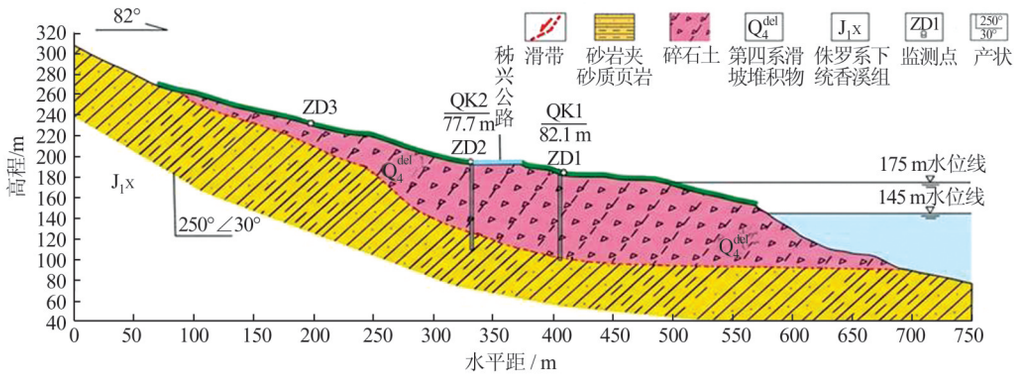


图 1 白家包滑坡工程地质剖面图

QK1、QK2 为自动测斜水位综合监测孔;ZD1、ZD2 和 ZD3 为 GNSS 自动化位移监测点,分别用于表征滑坡前缘、中部和中后部的地表变形响应。

Fig. 1 Engineering geological profile of Baijiabao landslide

QK1 and QK2 are automatic inclinometer and water-level integrated monitoring boreholes; ZD1, ZD2, and ZD3 are GNSS automatic displacement monitoring points, representing the surface deformation responses of the front, middle, and middle-to-rear parts of the landslide, respectively.

自 2003 年水库蓄水以来,白家包滑坡由相对稳定状态逐渐发展为渐进性蠕变。地质调查与宏观巡查结果显示,2006 年后滑坡位移速率明显放大,对库水位涨落愈发敏感。2007—2009 年间,滑体右侧边界公路沿线陆续出现张拉裂缝(图 2);2012 年和 2014 年,滑坡后缘形成垂直错动约 40 cm 的裂隙,周缘裂缝逐渐贯通,滑坡整体蠕变特征日益明显,且右侧变形程度显著大于左侧。为获取白家包滑坡地表变形过程,2017 年起在滑坡体上布设了全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)监测点。考虑到本文主要分析滑坡不同部位的连续变形响应,选取自动化监测点 ZD1、ZD2 和 ZD3 作为代表性监测点,其中 ZD1 位于滑坡前缘,ZD2 位于滑坡中部,ZD3 位于滑坡中后部,具体位置见图 2。图 3 展示了白家包滑坡整体地貌、滑坡边界及监测点空间分布。

1.2 GeoStudio 数值模型

1.2.1 数值模型构建

为定量分析白家包滑坡在库水位与降雨作用下的渗流-稳定性响应,采用 GeoStudio 数值模型,通过 SEEP/W(渗流分析模块)与 SLOPE/W(边坡稳定性分析模块)进行单向耦合计算。

滑坡体在降雨入渗和库水位退降过程中经历饱和-非饱和状态转变,其渗流过程采用非饱和渗流控制方程描述:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{\mathrm{w}}\frac{\partial h_{\mathrm{w}}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{\mathrm{w}}\frac{\partial h_{\mathrm{w}}}{\partial y}\right)+Q=m_{\mathrm{w}}\gamma_{\mathrm{sat}}\frac{\partial h_{\mathrm{w}}}{\partial t} \quad (1)$$

式中:k_{w} 为不同方向的渗透系数;Q 为施加的边界流量;m_{w} 为比水容重;γ_{sat} 为土体的饱和重度;h_{w} 为孔隙水压力水头。

采用 van Genuchten 模型,结合饱和渗透系数和饱和体积含水率确定滑体及滑带土的土-水特征曲线和渗透系数函数。边界条件设置如下:滑面及库水位以上坡面(非降雨工况)为零通量边界,库水位以下坡体边界为定水头边界。以 175 m 为初始水位进行稳态计算,获得初始渗流场与稳定性状态。基于白家包滑坡地质剖面建立二维计算模型,岩土体物理力学参数以《白家包滑坡工程地质勘察报告》[25]

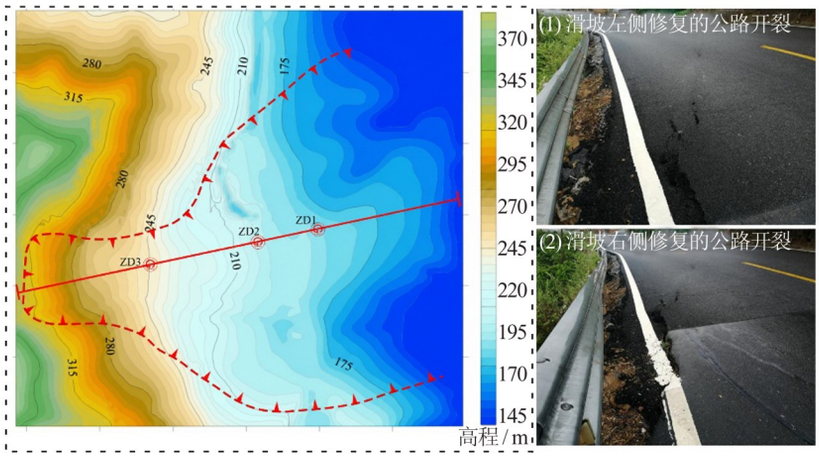


图2　研究区域自动化监测点布设及宏观变形(1)(2)

Fig. 2　Layout of automatic monitoring points and macroscopic deformation (1) and (2) in the study area

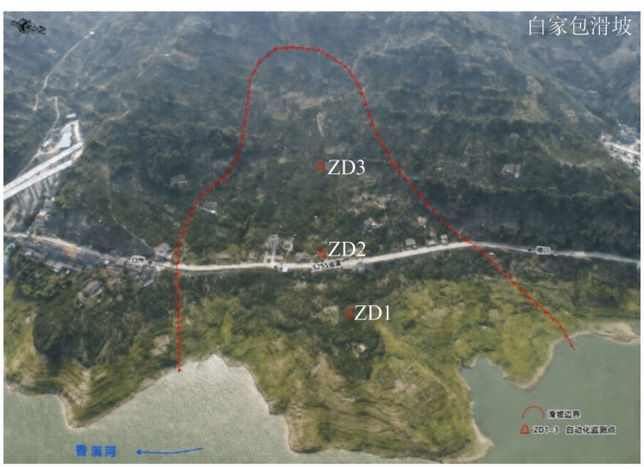


图3　研究区概貌

Fig. 3　Overview of the study area

为依据,结合滑坡天然工况下处于基本稳定-欠稳定状态的特征,对黏聚力和内摩擦角等参数进行校核与调整,最终计算参数见表1。

1.2.2　数值模型验证

为验证所建数值模型的可靠性,将SEEP/W计算得到的各阶段瞬态孔隙水压力场导入SLOPE/W模块,计算滑坡稳定性的安全系数(F_s),并绘制其随时间的变化曲线(图4)。计算结果表明,在库水位从145 m(0 d)升至175 m(60 d)的过程中,F_s从约1.45增至约1.80,并在t=60 d达到峰值;当库水位稳定在175 m后,F_s骤降至1.45,随后在60～200 d内保持相对稳定;当库水位快速下降时,F_s持续降低,由约1.45降至约1.20,并在260 d达到整个周期最低值。

由此可见,库水位波动条件下白家包滑坡稳定性具有明显的阶段性响应特征:0～60 d为库水位上升阶段,坡体前缘受库水反压作用增强,F_s整体升高;60～200 d为稳定蓄水阶段,坡体渗流场逐渐趋于平衡,F_s相对稳定;200～260 d为库水位快速下降阶段,坡体内部孔隙水压力消散滞后于外部水位回

表1　白家包滑坡岩土物理力学计算参数

Table 1　Physico-mechanical calculation parameters of rock and soil for Baijiabao landslide

部位	容重/(kN/m^3)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m/d)	泊松比	弹性模量/(10^4 MPa)
滑体	19.2	35.5	22.5	0.027 3	0.35	0.32
滑带	18.5	32.5	16.8	0.002 4	0.49	0.30
滑床	22.5	250.0	45.0	0.067 2	0.22	6.50

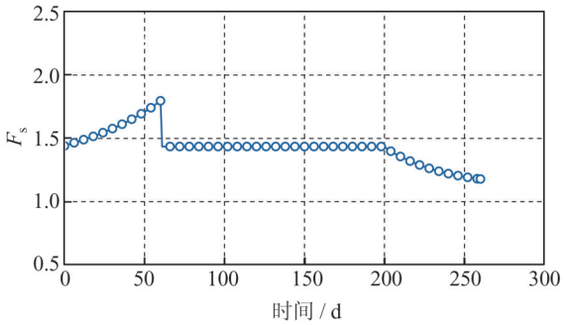


图4 F_s随时间的变化曲线图

Fig. 4 Variation curve of F_s with time

落,F_s持续降低。结果表明,库水位升降过程能够改变坡体渗流场和稳定性状态,为后文分析阶跃型位移形成机制提供数值依据。

1.3 VMD-IDBO-LSTM预测模型

白家包滑坡累积位移序列受库水位波动、降雨入渗及坡体滞后渗流响应共同影响,表现出非平稳性、非线性和局部突变特征。为提高阶跃型位移序列的预测精度,采用VMD提取位移序列的多尺度特征,并结合IDBO对LSTM进行参数优化,构建VMD-IDBO-LSTM混合预测模型。

1.3.1 预测模型方法原理

t时刻滑坡的累积位移y_t可分解为趋势项S_t、周期项C_t和随机项R_t[23]:

$$y_t = S_t + C_t + R_t \tag{2}$$

采用VMD模型,通过求解约束变分问题,将原始位移序列分解为K个具有有限带宽的模态分量,提取不同时间尺度下的变化特征:

$$\begin{cases} \min\limits_{\{y_k\},\{\omega_k\}} \left(\sum\limits_{k=1}^{K} \left\| \partial_t \left(\left(\delta(t) + \dfrac{\mathrm{j}}{\pi t} \right) y_k(t) \right) \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t} \right\|_2^2 \right) \\ \text{s.t.} \sum\limits_{k=1}^{K} y_k = y \end{cases} \tag{3}$$

式中:y为原始输入信号;$y_k(t)$为第k个模态分量;ω_k为第k个模态分量对应的中心角频率;$\{y_k\}$和$\{\omega_k\}$分别为模态分量集合及中心角频率集合;K为预设分解层数;$\delta(t)$为单位冲激函数,用于构造解析信号的数学运算;j为虚数单位,用于构造希尔伯特解析信号,实现信号瞬时频率求解与频谱解调;约束条件$\sum\limits_{k=1}^{K} y_k = y$为各模态分量可重构原始信号。

模态分量和中心频率的迭代更新如下:

$$\hat{y}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{y}(\omega) - \sum\limits_{i \neq k} \hat{y}_i^n(\omega) + \dfrac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \tag{4}$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega \left| \hat{y}_k^n(\omega) \right|^2 \mathrm{d}\omega}{\int_0^\infty \left| \hat{y}_k^n(\omega) \right|^2 \mathrm{d}\omega} \tag{5}$$

式中:$\hat{y}(\omega)$为原始信号的频域表达;$\hat{y}_k^{n+1}(\omega)$为第k个模态分量在第$n+1$次迭代时的频域表达;$\hat{\lambda}^n(\omega)$为第n次迭代时的拉格朗日乘子;α为二次惩罚因子;ω为角频率;ω_k^n和ω_k^{n+1}分别为第k个模态分量在第n次和第$n+1$次迭代时的中心角频率;$\left| \hat{y}_k^n(\omega) \right|^2$表示模态分量在频域中的能量分布。

在实现位移分解后,采用LSTM模型对各分量进行预测。LSTM的预测性能受隐藏层节点数、学习率和训练次数等超参数影响较大,传统人工调参效率低且易陷入局部最优。为此,引入蜣螂优化(Dung Beetle Optimization, DBO)算法。针对原始DBO在全局搜索与局部开发之间平衡不足的问题,通过可变螺旋搜索、Lévy飞行和自适应t分布变异3种策略提高参数寻优的能力,构建IDBO,其计算见式(6)~(8):

$$\begin{aligned} B_i^{t+1} = {} & x_{\text{gbest}}^t + \mathrm{e}^{zl} \cdot \cos(2\pi l) \cdot b_1 \cdot (B_i^t - L_{\text{b}}^*) + \mathrm{e}^{zl} \cdot \\ & \cos(2\pi l) \cdot b_2 \cdot (B_i^t - U_{\text{b}}^*) \end{aligned} \tag{6}$$

式中:B_i^t和B_i^{t+1}分别为第i个卵球在第t次和$t+1$次迭代时的位置;x_{gbest}^t为第t次迭代时全局最优位置;b_1、b_2为$1 \times D$的独立随机向量,D为优化问题维度;L_{b}^*、U_{b}^*分别为产卵区的下界、上界;z和l为螺旋搜索参数。

$$x_i^{t+1} = x_{\text{lbest}}^t + L \cdot N \cdot \left(\frac{\left| x_i^t - x_{\text{gbest}}^t \right| + \left| x_i^t - x_{\text{lbest}}^t \right|}{2} \right) \tag{7}$$

式中:x_i^t和x_i^{t+1}分别为第i个个体在第t次和第$t+1$次迭代时的位置;x_{lbest}^t为第t次迭代时局部最优位置;L表示Lévy飞行步长;N为随机扰动系数。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + x_i^t \cdot t(\text{iter}) \tag{8}$$

式中:t(iter)为随迭代次数变化的自适应t分布变异项。

基于上述方法,构建VMD-IDBO-LSTM混合模型,流程如图5所示。

1.3.2 预测模型验证

为验证VMD-IDBO-LSTM混合模型的有效性,选取白家包滑坡ZD1监测点2020年10月至2022年9月的位移数据进行测试,其中前70%作为训练集,后30%作为测试集。考虑到白家包滑坡累积位移主要包含长期趋势、周期扰动和局部突变等变化信息,本文将VMD分解层数K设为3,以提取不同尺度下的位移变化特征。VMD参数设置为:带宽约束α=2 000、中心频率初始化init=1、收敛容

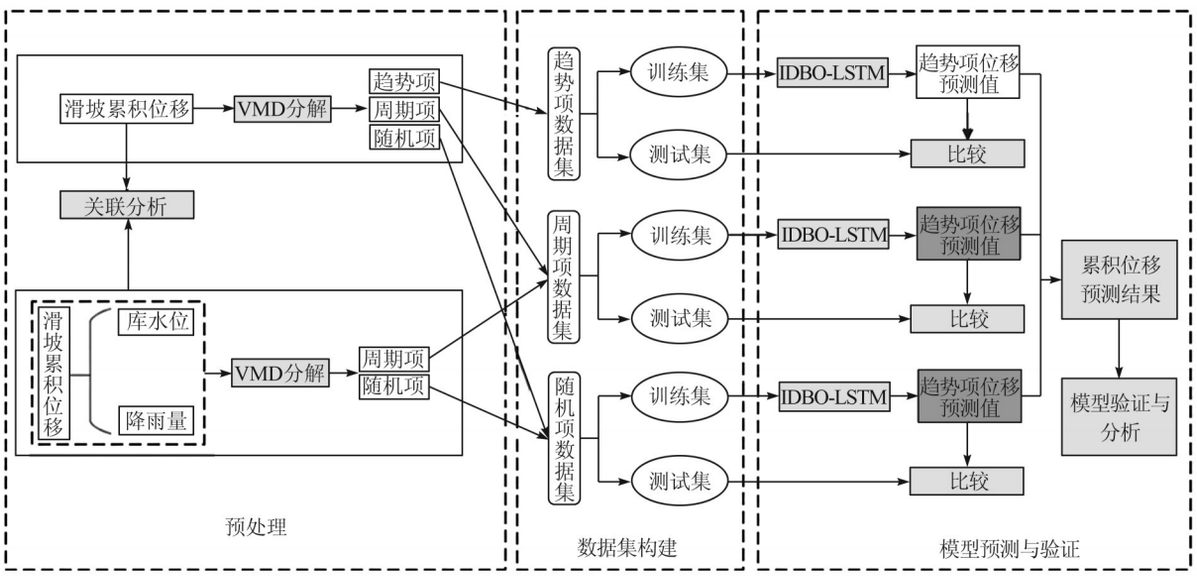
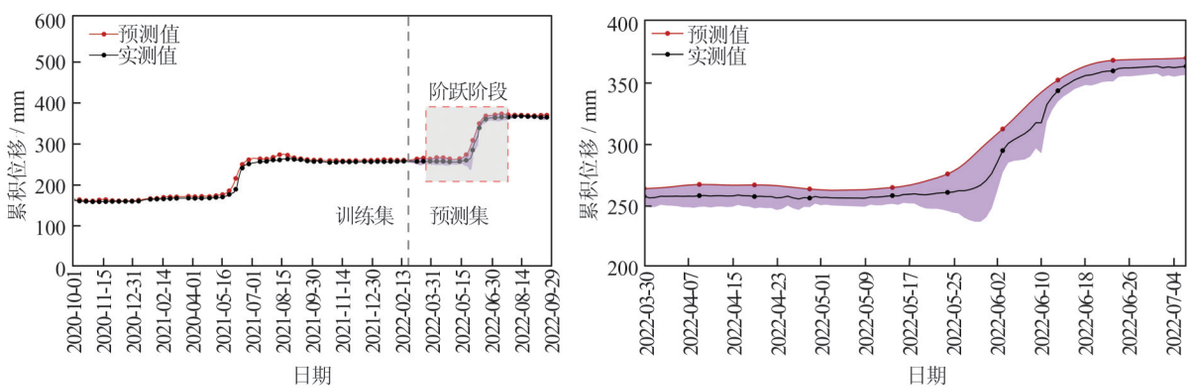


图5　VMD-IDBO-LSTM模型算法流程图

Fig. 5　Flowchart of VMD-IDBO-LSTM model algorithm

差=1×10^{-7},直流分量和噪声因子均设为0。通过对比预测位移值与实测位移值,评估模型的预测性能。如图6(a)所示,VMD-IDBO-LSTM模型预测值曲线与实测值曲线整体吻合较好,能够反映白家包滑坡累积位移的阶段性增长特征。图6(b)放大显示了预测集中的阶跃阶段,预测值与实测值在位移突增前后的变化趋势基本一致,表明该模型对阶跃型位移突变过程具有较好的跟踪能力。因此,VMD-IDBO-LSTM模型能够有效预测白家包滑坡累积位移的整体演化趋势及其阶跃响应特征。



(a) 整体预测结果　　(b) 预测集阶跃阶段局部放大图

图6　累积位移预测结果

Fig. 6　Prediction results of cumulative displacement

2　结果与讨论

2.1　白家包滑坡变形演化机制

图7为自2017年以来GNSS自动监测获取的滑坡累积位移-时间曲线,揭示了滑坡变形的阶跃型特征。由图7可见,2017年以来白家包滑坡累积位移整体呈“缓慢累积-快速跃升-阶段稳定”的阶梯式增长特征,且ZD2、ZD3的累积位移明显大于ZD1,表明滑坡中部和中后部变形响应更强。在2022年5月底至6月初,滑坡前缘的ZD1、中部的ZD2及中后部的ZD3三个监测点均出现明显位移增长现象,该时段对应库水位快速下降期。与往年相比,2022年消落期的总变形量显著增大,表明滑坡变形不仅受水位变幅影响,还与水位下降速率密切相关[26]。监测数据显示,滑坡变形响应存在滞后于库水位变化的特征,这与弱透水-滞后型坡体内水压释放受阻的特性相符。此外,滑坡变形表现出明显的时空差异性:2022年阶跃期结束后,前中部的ZD1和ZD2监测点变形趋于稳定,而中后部的ZD3变形持续发展,直至10月上旬才逐渐稳定。这

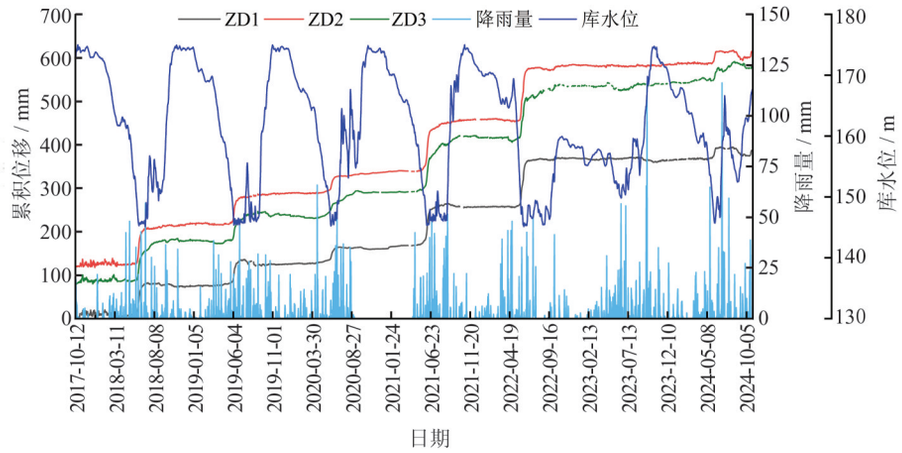


图 7 白家包滑坡 GNSS 自动监测累积位移-时间曲线

Fig. 7 Cumulative displacement-time curves from GNSS automatic monitoring of Baijiabao landslide

一差异表明,后期强降雨对滑坡后缘变形具有叠加效应,后缘对降雨入渗的响应强于前缘。

白家包滑坡的变形演化过程受内部地质条件与外部水文地质因素的非线性耦合作用影响。其中,滑坡位移速率主要受库水位周期性变化的调控。在水位上升期(每年 11 月至次年 2 月),库水压力对坡体前缘产生反压作用,并形成附加静水压力,从而暂时增强整体稳定性。而在水位消落期,特别是快速下降阶段,滑坡变形显著加剧,呈现阶跃型突变特征。考虑到中部监测点 ZD2 的变形趋势与整体变形高度一致,本文选取 ZD1 和 ZD3 进行分析。图 8 表明,随库水位下降幅度增大,滑坡日位移速率整体呈指数型增长。2021 年,ZD1 和 ZD3 的拟合方程对应的 R^2 分别为 0.793 和 0.801,说明该阶段位移速率与库水位下降幅度之间具有较好的拟合关系。2022 年,ZD1 和 ZD3 的拟合方程对应的 R^2 分别为 0.636 和 0.540,拟合度有所降低,表明该年滑坡变形除受库水位快速下降控制外,还受到降雨入渗和局部变形差异的叠加影响。总体来看,随着库水位下降幅度增大,尤其在接近消落末期时,滑坡日位移速率明显升高,其主要控制机制为动水压力效应[27]。由于滑带土渗透性极低,远小于库水位下降速率,坡体内地下水位消散严重滞后。这种滞后效应在坡体内外形成指向临空面的水头差,显著增大了下滑力,同时降低了滑带的有效正应力,进而加速剪切带活化和位移突变[28]。

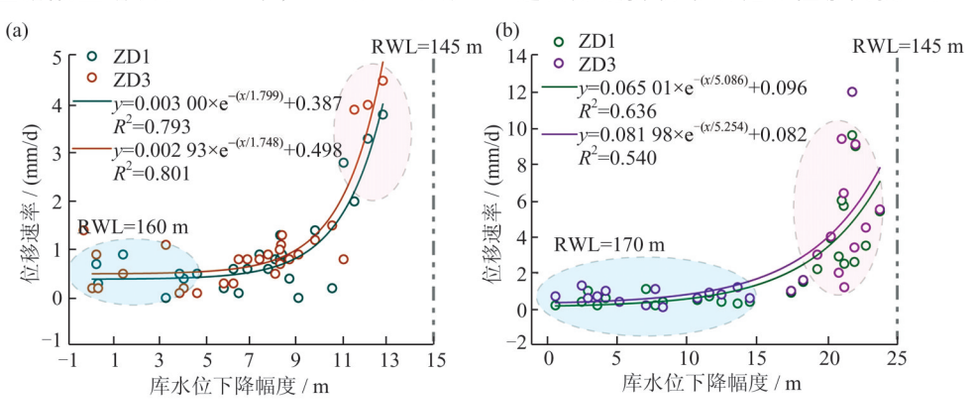
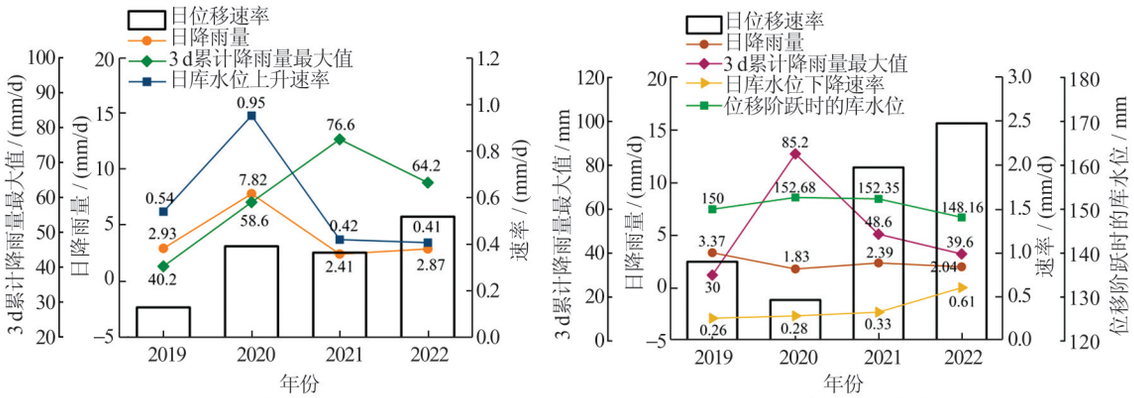


图 8 2021 年(a)和 2022 年(b)库水位快速下降阶段滑坡日位移速率

Fig. 8 Daily displacement rate of landslide during rapid decline of RWL in 2021 (a) and 2022 (b)

研究表明[29-30],前 3 d 累计降雨量最大值对滑坡变形具有显著影响,尤其是在 70~1 000 mm 的降雨范围内。滑坡对前期降雨量较为敏感,但与日降雨量的相关性较弱。图 9 展示了 2019—2022 年各参数与日位移速率的变化特征。将日位移速率连续 3 d 超过 0.5 mm/d 定义为一次位移阶跃过程,据此识别 ZD3 的阶跃日期分别为 2019-05-30、2020-05-17、2021-05-21 和 2022-06-04。在库水位上升阶段(图 9(a)),日位移速率普遍较低,各参数间的对应关系不明显;进入库水位快速下降阶段(图 9(b)),日位移速率与日库水位下降速率呈正相关。其中,2022 年在日库水位下降速率为 0.61 m/d 时,日位移速率进一步增大,而同期日降雨量和 3 d 累计降雨量最大值均未达到峰值。这一现象表明,库水位的



(a) ZD3库水位上升阶段　　(b) ZD3库水位下降阶段

图9　2019—2022年各参数与日位移速率变化趋势

Fig. 9　Variation trends of various parameters and daily displacement rates from 2019 to 2022

快速下降是白家包滑坡发生阶跃型变形的主要控制因素,而降雨主要起到叠加和放大变形的次要作用[31]。此外,各年阶跃过程对应的库水位分别为150.00 m(2019年)、152.68 m(2020年)、152.35 m(2021年)和148.16 m(2022年),说明阶跃变形主要发生在148～153 m的水位范围内。

上述监测结果表明,白家包滑坡阶跃型位移并非单一降雨作用的结果,而是与库水位快速下降引起的滞后渗流密切相关。这为进一步分析其变形机制和开展位移预测提供了依据。

2.2　数值模拟结果

2.2.1　库水位波动对阶跃型滑坡的影响

为分析坡体不同位置处孔隙水压力和渗流响应的变化特征,在二维数值模型中选取7个特征点(距离,高程)提取模拟结果。图10、11分别为7个特征点在库水位上升、稳定蓄水和下降阶段的孔隙水压力变化过程,揭示了坡体孔隙水压力响应的显著阶段性和空间差异性。

1) 库水位上升阶段(0～60 d)

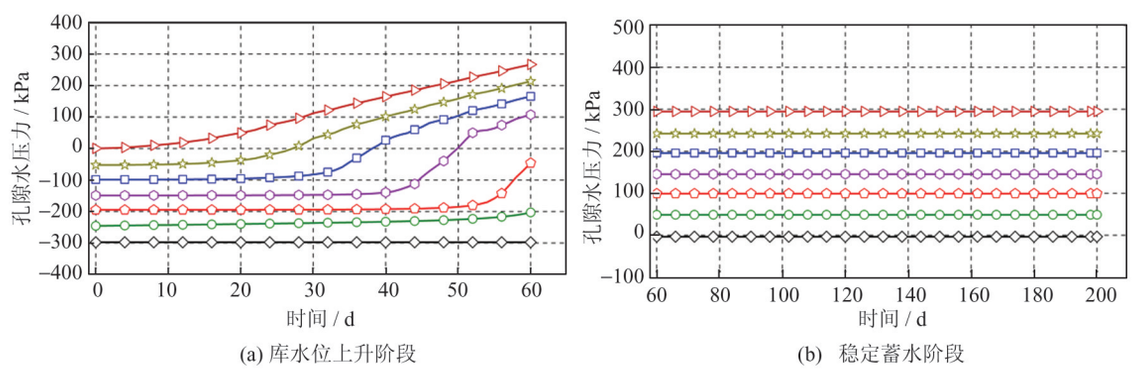
如图10(a)所示,当库水位从145 m升至175 m时,各特征点的孔隙水压力总体呈上升趋势,但空间响应存在显著差异。坡脚特征点(552,145)响应最快,其孔隙水压力随库水位升高近似呈线性增长,60 d后达到266 kPa,表现出典型的静水压力特征[13]。位于较高位置的特征点(526,160)响应明显滞后,而坡顶特征点(463,175)基本不受库水位变化影响。这表明库水位上升过程中,渗流场从坡脚向坡体内部逐步调整,浅层和底部区域首先响应,而高海拔和深层区域的响应相对滞后。

2) 稳定蓄水阶段(60～200 d)

如图10(b)所示,在库水位保持175 m恒定期间,各特征点的孔隙水压力总体趋于稳定,坡体渗流场逐渐从瞬态过渡到稳态,最终达到与175 m库水位相对应的平衡状态。

3) 库水位下降阶段(200～260 d)

如图11(a)所示,当库水位快速回落时,各特征点的孔隙水压力总体呈下降趋势,但不同位置的响应幅度存在明显差异。其中,靠近库水位作用范围的特征点孔隙水压力较高且下降幅度较大,而位于较高部位的特征点内部孔隙水压力变化相对较小,

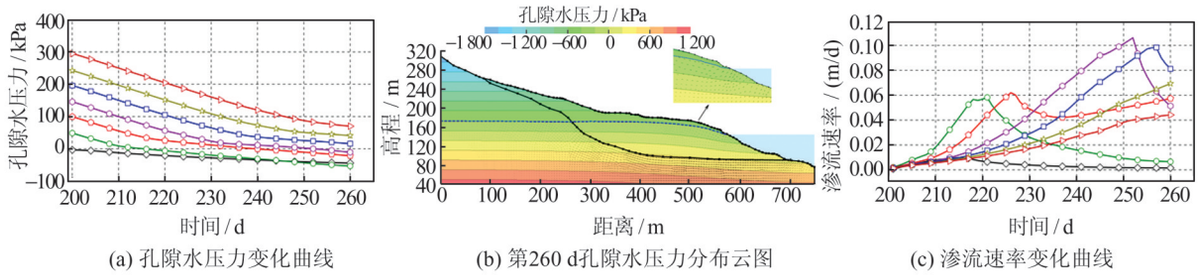


(a) 库水位上升阶段　　(b)　稳定蓄水阶段

图10　孔隙水压力变化曲线

Fig. 10　Variation curves of pore water pressure

表明坡体不同部位对库水位消落的响应并不同步。结合图 11(b)可见,外部库水位下降后,坡体内部仍保留一定孔隙水压力,说明内部孔隙水压力消散相对于外部水位回落存在滞后,从而形成内外水头差。在此情况下,坡体内部产生指向坡外的反向水力梯度,对坡体稳定性产生不利影响[32]。图 11(c)进一步显示,各特征点的渗流速率变化也存在明显差异:高程较高的特征点渗流速率较小,受库水位下降影响较弱;中下部特征点渗流速率增幅较大,并在水位下降后期达到峰值,说明快速消落阶段渗流扰动主要集中在坡体中下部及库水位变动影响范围内。



(a) 孔隙水压力变化曲线 (b) 第260 d孔隙水压力分布云图 (c) 渗流速率变化曲线

图 11 库水位下降阶段孔隙水压力与渗流响应特征

Fig. 11 Pore water pressure and seepage response characteristics during RWL drawdown

为分析库水位升降速率对滑坡稳定性的影响,设置 3 组库水位波动工况,具体计算条件见表 2;相应的 F_s 变化过程如图 12 所示。

表 2 不同库水位升降速率工况

Table 2 Schemes of different RWL fluctuation rates

工况	水位上升阶段	蓄水期	水位下降阶段
1	时间:0→60 d 水位:145→175 m 速率:0.5 m/d	时间:60→200 d 水位:175 m	时间:200→260 d 水位:175→145 m 速率:0.5 m/d
2	时间:0→30 d 水位:145→175 m 速率:1 m/d	时间:30→230 d 水位:175 m	时间:230→260 d 水位:175→145 m 速率:1 m/d
3	时间:0→20 d 水位:145→175 m 速率:1.5 m/d	时间:20→240 d 水位:175 m	时间:240→260 d 水位:175→145 m 速率:1.5 m/d

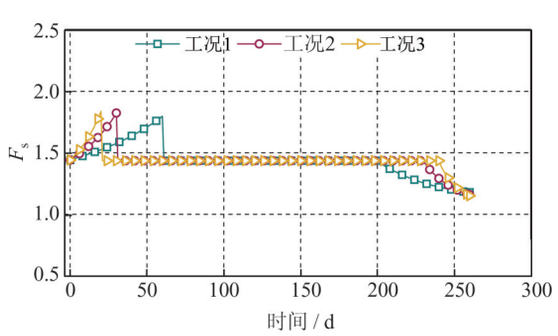


图 12 F_s 变化曲线图

Fig. 12 Variation curve of F_s

图 12 显示,在水位上升阶段,库水位上升速率越大,F_s 上升越快。其中,工况 3 的 F_s 变化最为显著,工况 2 次之,工况 1 变化最为缓慢。进入稳定蓄水阶段后,3 种工况的 F_s 逐渐趋于一致,最终稳定在约 1.45。在水位下降阶段,库水位下降速率越大,F_s 下降越快,且达到最低值的时间越早;3 种工况下 F_s 均呈降低趋势,但曲线下降斜率随库水位下降速率增大而增大。其中,工况 3 对应曲线的下降斜率最大,说明其单位时间内稳定性衰减最快;工况 2 次之;工况 1 下降过程相对平缓。由此表明,库水位下降速率越大,F_s 衰减越快,滑坡越早进入低稳定性状态。上述结果表明,库水位升降速率不仅影响 F_s 的变化率,还决定了其峰值出现的时间。总体来看,库水位波动使滑坡稳定性呈现“增强-趋稳-减弱”的阶段性响应特征,其中库水位快速下降对滑坡稳定性最为不利。

2.2.2 降雨入渗对阶跃型滑坡的影响

基于湖北省的典型气象特征,选取大雨和暴雨两种极端降雨工况进行对比分析,具体参数见表 3。降雨前,地下水位以上区域处于非饱和状态,表现为负孔隙水压力。降雨入渗后,各特征点的孔隙水压力均呈上升趋势,即负孔隙水压力逐渐减小并趋近于 0,表明降雨入渗削弱了土体基质吸力[33]。对比图 13(a)和(b)可见,在相同降雨历时条件下,工况 2 各特征点的孔隙水压力上升速率更快,且更

表 3 降雨工况

Table 3 Rainfall conditions

工况	降雨强度/(m/d)	连续降雨/d	雨停/d	总模拟时长/d
1	0.04	5	10	15
2	0.08	5	10	15
3	0.04	10	15	25

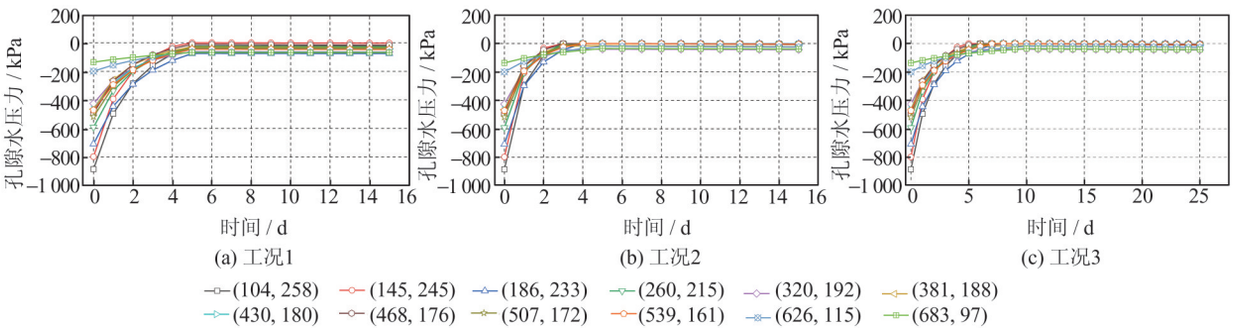


图13　特征点的孔隙水压力

Fig. 13　Pore water pressure at characteristic points

早达到稳定值,说明降雨强度增大会加速雨水入渗和负孔隙水压力的消散过程。对比图13(a)与图13(c)的曲线变化,工况3各特征点的孔隙水压力上升过程持续时间更长,达到稳定状态所需时间更久,表明持续降雨会扩大降雨入渗的影响范围,并增强坡体的水力响应。综上所述,降雨强度和持续时间均影响坡体孔隙水压力演化过程,其中较大的降雨强度和较长的降雨历时均有利于负孔隙水压力的快速消散,从而降低坡体的稳定性。

将3种降雨工况下的瞬态孔隙水压力场导入SLOPE/W模块,得到F_s随时间的变化,如图14所示。图14(a)显示,在相同降雨持续时间条件下,工况1和工况2的F_s均随时间逐渐减小,其中工况2的下降幅度略大于工况1。至第14 d时,工况2的F_s达到最低1.46,降幅约为0.01,这表明较大的降雨强度会加速雨水入渗和基质吸力衰减,从而导致滑坡稳定性持续降低。图14(b)表明,在相同降雨强度条件下,工况3的F_s下降持续时间更长,约在第20 d时降至最低值1.46,降幅约为0.01,明显大于工况1。这说明延长降雨持续时间会增加累积入渗量,延缓孔隙水压力的消散过程,进而导致滑坡稳定性劣化持续时间延长且降幅增大。由此可见,降雨强度和持续时间均影响阶跃型滑坡的稳定性,其中持续降雨条件下的稳定性衰减更为显著。

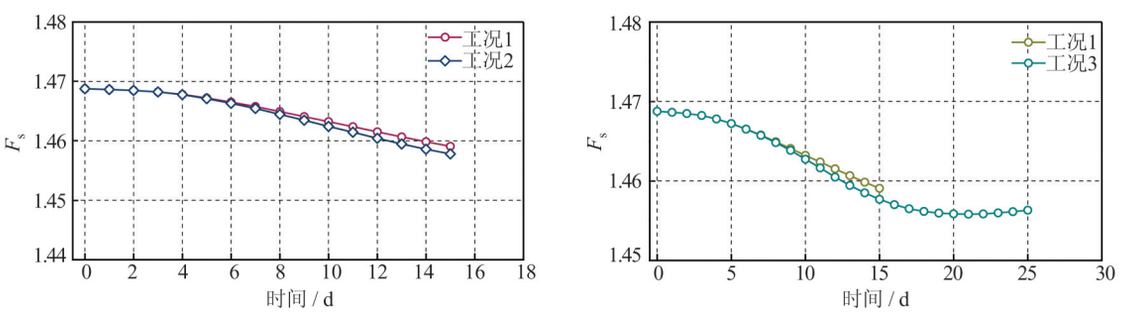


图14　滑坡F_s动态变化

Fig. 14　Dynamic variation of landslide F_s

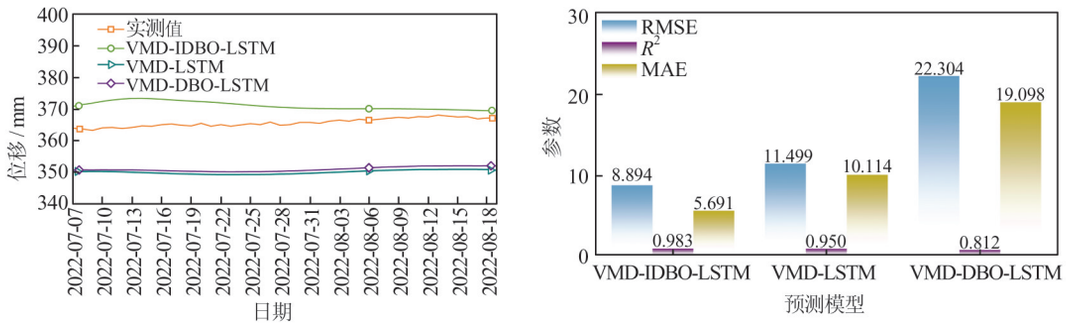
数值模拟结果表明,降雨-库水位变动下白家包滑坡阶跃型变形受水力作用控制。库水位快速消落使低渗滑带内孔隙水压力难以及时消散,促使坡体内外形成显著水头差并引起稳定性快速降低,是诱发阶跃型位移的主要控制因素;降雨入渗则通过削弱基质吸力进一步降低坡体稳定性,主要起叠加作用。

2.3　VMD-IDBO-LSTM预测结果

运用VMD-IDBO-LSTM模型从数据驱动角度对白家包滑坡累积位移进行预测,选取VMD-LSTM和VMD-DBO-LSTM作为对比模型,以分析不同模型对阶跃型滑坡位移的预测能力。

图15(a)展示了3种模型的预测结果与实测累积位移值的对比情况。分析图15(a)可知,VMD-IDBO-LSTM模型的预测曲线与实测位移变化趋势吻合较好,能够反映白家包滑坡位移的演化过程;而VMD-LSTM和VMD-DBO-LSTM模型的拟合效果相对较差,对位移幅值的表征能力较弱。

图15(b)的定量分析结果表明,VMD-IDBO-LSTM模型的RMSE、MAE和R^2分别为8.894 mm、5.691 mm和0.983,3项指标均优于VMD-LSTM和VMD-DBO-LSTM模型。VMD-DBO-LSTM因原始DBO算法易陷入局部最优导致超参数配置不当,在阶跃突变阶段预测失效,其精度反



(a) 预测结果对比 (b) 预测精度指标对比

图 15 不同预测模型累积位移

Fig. 15 Cumulative displacement of different prediction models

而低于 VMD-LSTM 模型。与 VMD-LSTM 和 VMD-DBO-LSTM 模型相比，VMD-IDBO-LSTM 模型的 RMSE 分别降低了 22.7% 和 60.1%；R^2 分别提高了 0.033 和 0.171；MAE 分别降低了 43.7% 和 70.2%。VMD-IDBO-LSTM 模型通过 VMD 提取累积位移序列的多尺度特征，并利用 IDBO 优化了 LSTM 模型参数，因此在阶跃变形阶段表现出较好的跟踪能力。

3 结 论

本文以三峡库区白家包滑坡为研究对象，基于地质调查、监测数据以及数值模拟分析，探讨了降雨-库水位变动作用下阶跃型滑坡的变形机制，并构建了 VMD-IDBO-LSTM 混合预测模型。主要结论如下：

1)白家包滑坡表现出典型的弱透水-滞后型变形特征，其中库水位快速下降是控制其阶跃型变形的主要因素；降雨则主要对滑坡后缘变形产生叠加影响。

2)数值模拟结果表明，白家包滑坡稳定性随库水位波动呈现“增强-趋稳-减弱”的阶段性响应；库水位快速下降阶段坡体内部孔隙水压力消散滞后，形成显著内外水头差，导致 F_s 持续降低并达到计算周期内最低水平。

3)降雨入渗会削弱坡体负孔隙水压力并降低滑坡稳定性，且降雨强度和持续时间均会影响坡体的水力响应特性；在持续降雨条件下，稳定性衰减更为显著，但其整体影响程度仍弱于库水位快速下降的作用。

4)针对降雨-库水位变动作用下的阶跃型位移预测，VMD-IDBO-LSTM 模型的预测性能均优于 VMD-LSTM 和 VMD-DBO-LSTM 模型。

参考文献：

[1] SASAHARA K, SAKAI N. Development of shear deformation due to the increase of pore pressure in a sandy model slope during rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2014, **170**: 43-51. DOI:10.1016/j.enggeo.2013.12.005.

[2] PELASCINI L, STEER P, MOUYEN M, *et al*. Finite-hillslope analysis of landslides triggered by excess pore water pressure: The roles of atmospheric pressure and rainfall infiltration during typhoons[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, **22**(10): 3125-3141. DOI:10.5194/nhess-22-3125-2022.

[3] JIANG L, ZHENG Y N, ZHANG Q, *et al*. Investigation on the failure mechanism of slope deformations induced by water-level fluctuation with InSAR and numerical simulation: A case study[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2025, 58: qjegh2023-146. DOI:10.1144/qjegh2023-146.

[4] WU S S, TAO Z G, ZHANG L, *et al*. Early warning for stepwise landslides based on traffic light system: A case study in China[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(23): 4391. DOI:10.3390/rs16234391.

[5] WEI J B, WANG D K, YANG Z K, *et al*. Characteristics and mechanism of large deformation of a reservoir colluvial landslide-a case study of the Yulinerzu landslide in Xiluodu Reservoir, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, **11**: 1337998. DOI:10.3389/feart.2023.1337998.

[6] 谭银龙，许万忠，曹家菊，等. 基于 Midas-GTS 的三峡库区金鸡岭滑坡成因机制与稳定性分析[J]. 水文地质工程地质，2023，**50**(1)：113-121. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204054.

TAN Y L, XU W Z, CAO J J, *et al*. Mechanisms and stability analysis of the Jinjiling landslide in the Three Gorges Reservoir area based on Midas-GTS[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, **50**(1): 113-121. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204054(Ch).

[7] 袁旭凯，罗丹，许万忠，等. 三峡库区白杨湾含多级软弱滑带滑坡变形特征与成因机制分析[J]. 长江科学院院报，2023，

40(3): 143-150. DOI:10.11988/ckyyb.20211077.
YUAN X K, LUO D, XU W Z, *et al*. Deformation characteristics and formation mechanism of Baiyang Bay landslide containing multistage weak slip zones in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, **40**(3): 143-150. DOI: 10.11988/ckyyb.20211077(Ch).

[8] 尚敏, 袁朔, 王殿鹏, 等. 三峡库区黑石板滑坡的变形特征和涌浪预测[J]. 水利学报, 2024, **55**(10): 1236-1247. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20240267.
SHANG M, YUAN S, WANG D P, *et al*. The deformation characteristics and surge wave prediction of the Heishiban landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, **55**(10): 1236-1247. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20240267(Ch).

[9] 李麟玮, 吴益平, 苗发盛, 等. 考虑变形状态动态切换的阶跃型滑坡位移区间预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(11): 2272-2287. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2019.0410.
LI L W, WU Y P, MIAO F S, *et al*. Displacement interval prediction method for step-like landslides considering deformation state dynamic switching[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(11): 2272-2287. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2019.0410(Ch).

[10] HUANG X H, GUO F, DENG M L, *et al*. Understanding the deformation mechanism and threshold reservoir level of the floating weight-reducing landslide in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Landslides*, 2020, **17**(12): 2879-2894. DOI:10.1007/s10346-020-01435-1.

[11] YANG Y T, ZHANG C Y, LU Y S, *et al*. Mechanism of large-scale reservoir landslides with double-sliding zones: Insights from long-term field monitoring[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2024, **11**: 1301261. DOI:10.3389/fevo.2023.1301261.

[12] YANG G, WU Z L, ZHANG L, *et al*. A study on the deformation mechanism of a landslide reinforced with an anti-slip pile under the effect of reservoir water level decline[J]. *Water*, 2025, **17**(9): 1390. DOI:10.3390/w17091390.

[13] LIU G S, WANG B, SUN Q, *et al*. New insights into the reservoir landslide deformation mechanism from InSAR and numerical simulation technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, **18**: 2908-2927. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3523294.

[14] 陈铭熙, 陶培捷, 周创兵, 等. Verhulst反函数预测模型的改进及滑坡时间概率预测[J]. 地球科学, 2024, **49**(5): 1692-1705. DOI:10.3799/dqkx.2023.003.
CHEN M X, TAO P J, ZHOU C B, *et al*. Model modification of verhulst inverse-function forecasting model and probabilistic forecast for landslide failure time [J]. *Earth Science*, 2024, **49**(5): 1692-1705. DOI:10.3799/dqkx.2023.003(Ch).

[15] 贺汪延, 张巍, 李厚芝, 等. 知识图谱优化卡尔曼滤波预测库岸滑坡位移[J]. 高校地质学报, 2023, **29**(3): 372-381. DOI:10.16108/j.issn1006-7493.2022068.
HE W Y, ZHANG W, LI H Z, *et al*. Deformation prediction of reservoir landslides using knowledge graph optimized Kalman filter[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2023, **29**(3): 372-381. DOI:10.16108/j.issn1006-7493.2022068(Ch).

[16] WANG Y K, SUN X S, WEN T, *et al*. Step-like displacement prediction of reservoir landslides based on a metaheuristic-optimized KELM: A comparative study [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, **83**(8): 322. DOI:10.1007/s10064-024-03819-2.

[17] QI X, CAO R L, PENG D L. An improvement velocity inverse method for predicting the slope imminent failure time [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, **14**(1): 2239991. DOI:10.1080/19475705.2023.2239991.

[18] 杜岩, 宁利泽, 谢谟文, 等. 考虑时间滞后效应的库岸滑坡位移预测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, **49**(8): 1347-1355. DOI:10.13203/j.whugis20220133.
DU Y, NING L Z, XIE M W, *et al*. A prediction model of landslide displacement in reservoir area considering time lag effect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, **49**(8): 1347-1355. DOI: 10.13203/j.whugis20220133(Ch).

[19] ZHOU C, CAO Y, GAN L L, *et al*. A novel framework for landslide displacement prediction using MT-InSAR and machine learning techniques[J]. *Engineering Geology*, 2024, **334**: 107497. DOI:10.1016/j.enggeo.2024.107497.

[20] LIU Y, LONG J J, LI C D, *et al*. Physics-informed data assimilation model for displacement prediction of hydrodynamic pressure-driven landslide[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, **167**: 106085. DOI:10.1016/j.compgeo.2024.106085.

[21] XIA M, REN G M, ZHU S S, *et al*. Relationship between landslide stability and reservoir water level variation [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, **74**(3): 909-917. DOI:10.1007/s10064-014-0654-0.

[22] 冯谕,曾怀恩,邓华锋,等. 基于蠕滑趋势影响和特征优化算法的阶跃型滑坡位移预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, **44**(3): 705-720. DOI:10.3724/1000-6915.jrme.2024.0554.
FENG Y, ZENG H E, DENG H F, *et al*. A step-type landslide displacement prediction model based on creep trend influence and feature optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025, **44**(3): 705-720. DOI:10.3724/1000-6915.jrme.2024.0554(Ch).

[23] 汪标, 易庆林, 邓茂林, 等. 基于累积位移特征与时间序列组合模型的滑坡位移预测[J]. 工程地质学报, 2024, **32**(5): 1629-1639. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2022-0264.
WANG B, YI Q L, DENG M L, *et al*. Landslide displacement prediction based on cumulative displacement features and time series combination model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, **32**(5): 1629-1639. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2022-0264(Ch).

[24] SUN M C, GUO Y X, HUANG K, *et al*. A combined landslide displacement prediction model based on variational mode decomposition and deep learning algorithms[J]. *Water*, 2024, **16**(23): 3503. DOI:10.3390/w16233503.

[25] 易庆林. 白家包滑坡工程地质勘察报告[R]. 宜昌: 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 2024.
YI Q L. Engineering geological investigation report of Baijiabao landslide[R]. Yichang: Hubei Yangtze Three Gorges Landslide National Field Scientific Observation and Research Station, 2024(Ch).

[26] YANG B B, LIU Z Q, LACASSE S, *et al*. Spatiotemporal deformation characteristics of Outang landslide and identification of triggering factors using data mining[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, **16**(10): 4088-4104. DOI:10.1016/j.jrmge.2023.09.030.

[27] WEN H J, LI Y J, WANG X F, *et al*. Triggering mechanism of rainfall and reservoir water level dynamic change-induced step-like displacement for reservoir bank landslide [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2025, **50**(13): e70172. DOI:10.1002/esp.70172.

[28] ZOU Z X, TANG H M, CRISS R E, *et al*. A model for interpreting the deformation mechanism of reservoir landslides in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, **21**(2): 517-532. DOI:10.5194/nhess-21-517-2021.

[29] WANG B, ZUO Q J, DENG M L, *et al*. Deformation characteristics and chain mechanism of the Tanjiahe landslide in the Three Gorges Reservoir area under the synergistic effect of rainfall, reservoir water, and groundwater[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, **58**(5): 5235-5254. DOI:10.1007/s00603-025-04437-4.

[30] TSUNETAKA H. Comparison of the return period for landslide-triggering rainfall events in Japan based on standardization of the rainfall period[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, **46**(14): 2984-2998. DOI:10.1002/esp.5228.

[31] 邓茂林, 周剑, 易庆林, 等. 三峡库区靠椅状土质滑坡变形特征及机制分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1296-1303. DOI:10.11779/CJGE202007013.
DENG M L, ZHOU J, YI Q L, *et al*. Characteristics and mechanism of deformation of chair-shaped soil landslides in Three Gorges Reservoir area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(7): 1296-1303. DOI:10.11779/CJGE202007013(Ch).

[32] JIANG Z H, WANG H L, XIE W. Deformation mechanism of deposit landslide induced by fluctuations of reservoir water level based on physical model tests[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(11): 410. DOI:10.1007/s12665-021-09673-9.

[33] SORBINO G, NICOTERA M V. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides[J]. *Engineering Geology*, 2013, **165**: 105-132. DOI:10.1016/j.enggeo.2012.10.008.

□