

基于变权重组合预测模型的堆积层滑坡稳定性评价分析^{*}

Evaluation and Analysis of the Stability of Accumulation Landslide based on Variable weight Combination Prediction Model

王 猛¹, 王荣荣¹, 史 帅²

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院, 河南 郑州 450000;
2. 国家管网集团北方管道有限责任公司郑州输油气分公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 为合理评价堆积层滑坡的稳定性, 该文基于滑坡地质条件及发育特征, 先利用传递系数法开展滑坡稳定性的初步分析, 再结合变形监测成果, 通过变权重组合预测模型实现其变形预测, 以分析其稳定性的后续发展趋势, 进而综合实现滑坡稳定性评价。实例分析表明: 滑坡变形特征较为显著, 且在传递系数法的分析结果中, 在天然工况条件下, 滑坡均处于稳定状态, 但在不利工况条件下, 尤其在暴雨工况条件下, 稳定性系数范围为 1.04~1.09, 属欠稳定~基本稳定状态, 即不利工况条件下, 滑坡存在较大失稳风险; 同时, 变权重组合预测模型在滑坡变形预测结果中具有较小的相对误差均值及方差值, 即预测效果较优, 且滑坡后续预测速率与现有速率相当, 其中, 1#监测点和 2#监测点的预测速率还相对略大, 说明滑坡稳定性将趋于减弱。通过本文研究, 为堆积层滑坡提供了一种稳定性评价方法, 值得进一步推广应用研究。

关键词: 堆积层滑坡; 传递系数法; 变权重组合预测; 变形预测; 稳定性评价

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0134-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.022

WANG Meng¹, WANG Rongrong¹, SHI Shuai²

(1. The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology and Mineral Bureau, Zhengzhou 450000, China;
2. National Pipe Network Group North Pipeline Co., Ltd., Zhengzhou Oil and Gas
Transportation Branch, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to reasonably evaluate the stability of the accumulation landslide, based on the geological conditions and development characteristics of the landslide, this paper first uses the transfer coefficient method to carry out the preliminary analysis of the landslide stability, and then combined with the deformation monitoring results, realizes its deformation prediction through the variable weight combination prediction model to analyze the subsequent development trend of its stability, and then comprehensively realizes the landslide stability evaluation. The case analysis shows that the deformation characteristics of the landslide are relatively significant, and in the analysis results of the transfer coefficient method, the landslide is in a stable state under the natural conditions, but under the adverse conditions, especially under the rainstorm conditions, the stability coefficient ranges from 1.04 to 1.09, which belongs to an under stable to basically stable state, that is, under the adverse conditions, the landslide has a greater risk of instability; At the same time, the variable weight combination prediction model has small relative error mean value and variance value in the landslide deformation prediction results, that is, the prediction effect is better, and the subsequent prediction rate of landslide is equivalent to the existing rate. Among them, the prediction rate of 1 # monitoring point and 2 # monitoring point is relatively large, indicating that the landslide stability will tend to weaken. Through this study, it provides a stability evaluation method for accumulation landslide, which is worthy of further

^{*} 基金项目: 河南省国土资源厅 2018 年度省财政地质科研项目 (豫国土资发〔2018〕98 号-12)。

作者简介: 王猛 (1988—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 地质灾害防治、工程地质、环境地质、生态修复勘查设计治理、地质矿产勘查。

收稿日期: 2023-04-11

application and research.

Keywords: landslide of accumulation layer; transfer coefficient method; variable weight combination forecasting; deformation prediction; stability evaluation

0 引言

堆积层滑坡具有规模大、危险程度高等特点，因此，开展其研究具有重要意义^[1-2]。目前，也有学者开展看堆积层滑坡的相关研究，如冉涛等^[3]分析了工程建设对堆积层滑坡的影响机理；汤罗圣等^[4]构建了堆积层滑坡的失稳判据；张佳佳等^[5]阐述了库岸堆积层滑坡的形成机制及发育规律；上述研究虽取得了相应成果，但未涉及其稳定性研究，并顾及滑坡稳定性评价可直接指导其防治，现实意义重大，所以，该文重点开展堆积层滑坡的稳定性分析。一般来说，滑坡稳定性多是通过传递系数法评价^[6]，但该稳定性评价结果仅能用于评价滑坡现有状态，存在一定不足；考虑到滑坡变形是其稳定性的直观体现，因此，提出通过变形预测来评价滑坡稳定性的后续发展趋势，以弥补前述不足。滑坡变形具显著的非线性特征，传统单一模型难以实现其高精度预测，且雷恒等^[7]、方筠等^[8]充分验证了组合预测在滑坡变形预测中的适用性，加之变权组合的优势更为明显^[9]，所以提出利用变权重组合预测模型实现其变形预测。综合上述，该文以堆积层滑坡为工程背景，结合其勘察成果及变形监测成果，先利用传递系数法开展滑坡稳定性的初步分析，再利用变权重组合预测模型实现其变形预测，并通过预测结果分析滑坡稳定性的后续发展趋势，两者综合以保证滑坡稳定性评价的全面性。

1 基本原理

在引言基础上，论文分析过程可进一步总结为：在堆积层实例背景前提下，先分析其基本地质条件及发育特征，并利用传递系数法开展滑坡稳定性的初步分析；其次，结合变形监测成果，利用变权重组合预测模型实现滑坡变形预测，并通过预测结果分析滑坡稳定性的后续发展趋势，以综合评价滑坡稳定性。

据上，该节后续重点再对所涉理论的基本原理进行详述。

1.1 传递系数法的构建过程

传递系数法在滑坡稳定性评价中的普适性已被大量工程验证，所以，笔者提出以其开展滑坡稳定性的初步分析；同时，由于传递系数法的基本原理已在《滑坡防治工程勘察规范》（GB/T 32864-2016）中详述，为节约篇幅，笔者不在此详述。

①计算工况

一般来说，滑坡稳定性计算工况主要有三个，分别为：天然工况（即工况1）。该工况是计算天然状态下的滑坡稳定性；暴雨工况（即工况2）。该工况是计算暴雨状态下的滑坡稳定性；地震工况（即工况3）。该工况是计算地震状态下的滑坡稳定性，其与前两个工况的差异主要是计算过程还附加了地震力。

②计算参数

由于不同工况所处条件具有一定差异，使得其对应计算参数也随之不同；结合取样试验成果，将滑坡稳定性计算参数统计如表1所示。

表 1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

工况	容重/（kN/m ³ ）	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
天然工况	19.1	31.54	13.28
暴雨工况、地震工况	19.7	28.49	10.67

③稳定状态划分

通过计算可得到稳定性系数 F_s ，并可通过其判断滑坡所处的稳定状态，即：

若 F_s 值小于 1 时，滑坡处于不稳定状态。

若 F_s 值不小于 1 且小于 1.05 时，滑坡处于欠稳定状态。

若 F_s 值不小于 1.05 且小于 1.15 时，滑坡处于基本稳定状态。

若 F_s 值不小于 1.15 时，滑坡处于稳定状态。

1.2 变权组合预测模型的构建过程

由于本文滑坡预测模型具变权组合特征，因此，其分析过程可划分为两阶段，其一，是构建若干单项预测模型，并筛选出最优的单项预测结

研究与应用

果；其二，是利用遗传算法实现各单项预测结果的变权组合，以得到滑坡变形的最终预测结果。

(1) 单项预测模型的构建及筛选

结合以往经验，将滑坡变形的单项预测模型初步设计为四种^[10]，即长短时记忆神经网络(Long Short-Term Memory, LSTM)、支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)、梯度提升模型(Extreme Gradient Boosting, XGBoost)及轻量梯度提升机(Light Gradient Boosting Machine, LightGBM)，各类模型的基本原理分述如下：

①LSTM 模型

LSTM 模型是一种常用的时间序列预测模型，具有较优的长期预测能力，其在以往神经网络基础上增加了记忆单元，主要由输入门、忘记门及输出门组成，三者的作用如下：

a. 输入门。该步骤是将输入信息转化为模型所需信息。

b. 忘记门。该步骤是利用控制细胞实现预测信息的取舍，并结合更新细胞实现信息的更新。

c. 输出门。该步骤是将有用信息输出。

由于 LSTM 模型的基本原已在文献[11]中详述，本文不再赘述。

②SVR 模型

SVR 模型是一种机器学习算法，其普适性也较强，其思路为：利用函数将输入信息非线性映射至输出值，且在该过程中，应遵守误差最小原则。

在 SVR 模型应用过程中，其非线性映射关系为：

$$f(x) = wg(x) + b \quad (1)$$

式中： $f(x)$ 为输出映射值； w 为连接权值向量； $g(x)$ 为核函数； b 为偏置向量。

③XGBoost 模型

XGBoost 模型是提升度算法的改进模型，主要是将正则项加之到了目标函数中，能有效避免函数过拟合问题，具有相对更优的预测效率；同时，在该模型的预测过程中，其目标函数可表示为：

$$O_i = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{i=1}^n \Omega_i \quad (2)$$

式中： O_i 为目标函数值； n 为训练样本数； l_i 为预测差距衡量项； Ω_i 为正则化项。

同时，新生成的树可根据前一步的预测残差进行计算，即：

$$y_i = w'_{i-1} + m_i \quad (3)$$

式中： y_i 为新生成树的预测值； w'_{i-1} 为前一步的残差值； m_i 为新生成树的期望值。

将预测残差嵌入至目标函数中，并通过两者的不断迭代即可实现预测。

④LightGBM 模型

LightGBM 模型的核心思想是利用梯度提升树开展变形预测，即利用若干棵弱回归树构建出一棵强回归树，即：

$$F(x) = \sum_{i=1}^M f_i(x) \quad (4)$$

式中： $F(x)$ 为强回归树； $f_i(x)$ 为弱回归树； M 为弱回归树的棵数。

该模型相较提升度算法的优势主要体现在：

a. 引入直方图算法，将离散预测结果累积至直方图中，能有助于决策出分割点的选择。

b. 通过子叶生长算法限制决策树的最大深度，以避免过拟合现象的发生。

c. 利用互斥特征捆绑算法降低预测数据的特征维度，以提高预测模型的训练速度。

因此，LightGBM 模型的主要优势在于其训练速度。

综合上述，4 种单项预测模型具有不同的预测机理，其预测效果也应随之不同；笔者提出以各单项预测结果的相对误差值为评价指标，通过对其平均值及方差值求解来对比不同模型的预测效果。一般来说，相对误差的平均值越小，说明预测精度越高；相对误差的方差值越小，说明预测结果的稳定性越强。因此，利用上述指标再进一步开展单项预测模型的筛选处理，即筛选出最优的三个单项预测结果，并将其作为后续变形组合预测的基础。

(2) 变权组合模型的构建

变权组合是指不同单项预测模型在不同节点处的组合权重是不一致的。由于遗传算法能有效计算时变权重系数，因此，笔者提出利用遗传算法实现其变权组合预测，即将遗传算法的适应度函数设置为第 i 验证节点处的均方根误差，并通过其最小化原则，搜寻处该节点处的最佳组合权值，具体公式为：

$$GA(w_1, w_2, w_3) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [w_1 y'_1(i) + w_2 y'_2(i) + w_3 y'_3(i) - N(i)]^2} \quad (5)$$

式中： $w_1 \sim w_3$ 为3个单项预测模型的组合权值； $y'_1(i) \sim y'_3(i)$ 为相应节点处的预测值； $N(i)$ 为相应节点处的期望值。

通过上述处理即可得到各单项预测模型在相应验证样本或预测节点处的组合权值，再结合单项预测结果，就可以求得相应变权组合值。

总结上述，将变权重组合预测模型的结构总结如图1所示。

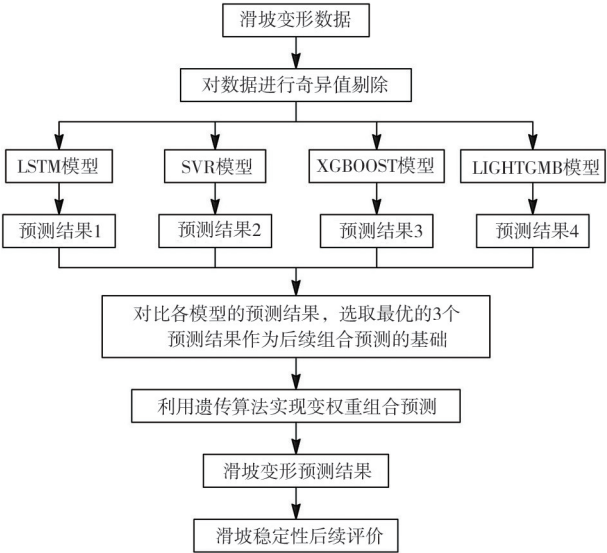


图1 变权重组合预测模型的结构

Fig. 1 Structure of variable weight combination forecasting model

以组合预测结果来评价滑坡稳定性的后续发展趋势，具体评价依据为：若滑坡后续变形速率大于现有变形速率，那么滑坡稳定性将趋于减弱；若滑坡后续变形速率近似等于现有变形速率，那么滑坡稳定性将维持现状；若滑坡后续变形速率小于现有变形速率，那么滑坡稳定性将趋于稳定。

2 实例分析

2.1 工程概况

某滑坡属河岸滑坡，位于河岸右侧，其失稳将会存在堵塞航道风险，因此，开展其稳定性评价具有重要意义；结合其勘查成果，将其地质条件及发育特征介绍如下：

2.1.1 滑坡地质条件

①地形地貌。滑坡区属中低山峡谷地貌，多具“V”形谷发育，海拔高程范围主要间于800~1540 m，切割深度约600~800 m；同时，区内斜坡多具陡缓变化特征，坡度间于25°~45°，整体植被

较发育。

②地层岩性。区内第四系地层主要为崩坡积层、残坡积层，岩性以碎块石土、粉质黏土为主，前者碎块石含量主要间于60%~75%，母岩以灰岩为主，次棱角状，结构松散；后者多呈可塑~硬塑，含有少量碎石，含量一般间于5%~15%，磨圆度也较差，遇水易软化。下覆基岩主要为三叠系侏罗系灰岩，灰白色，中厚层状，强度较高，局部存在溶蚀现象。

③地质构造。滑坡区附近主要发育有两组断层，其一，走向近似沿东西向，倾向为北，其倾角间于45°~64°，规模相对较小，与滑坡区净距约11 km；其二，走向近似沿南北向，倾向为西，倾角间于58°~78°，与滑坡区净距约16 km。总体来说，滑坡区附近发育有一定的构造，对滑坡灾害具有一定影响。

④水文地质条件。地表水主要为前缘河水，其属长江流域，年变幅较大，除此之外，区内未见其他地表水体。地下水类型主要分为三类，即孔隙水、裂隙水及溶隙水，其中，孔隙水主要存在于第四系地层中，含水层厚度差异较大，分布也很不均匀；裂隙水主要存在于基岩裂隙中，其富水程度与裂隙发育程度相关，对基岩结构的长期影响较大；溶隙水主要存在于灰岩溶穴中，其与其他水体的水力联系相对较少。

⑤人类工程活动。区内人类工程活动相对较少，仅有树木种植属其范畴，因此，人类工程活动对该滑坡的影响相对有限。

2.1.2 滑坡发育特征

滑坡平面形态近似呈“舌”形，主坡向为178°，纵向长度约520 m，横向宽度约370 m，深度20~50 m，总体积约1100×10⁴ m³，属特大型土质滑坡；同时，将滑坡平面形态表示如图2所示。

滑坡后缘发育有明显的弧形滑壁，以其作为滑坡后缘边界，左、右两侧近似以山脊为界，前缘以陡坎处为界，已被河水淹没。因此，总体来说，滑坡边界清晰。

根据钻探成果，将滑坡物质组成阐述为：

①滑体土。滑体土主要为崩坡积碎块石土，具堆积层特征，因此，该滑坡亦属堆积层滑坡；在滑坡不同位置，碎石土的碎石含量存在一定差异，其中，后缘碎石含量一般大于65%，前缘碎

研究与应用

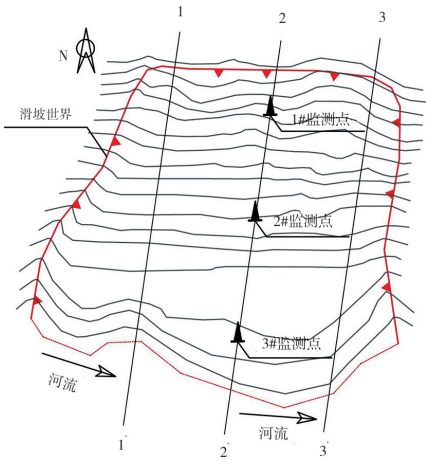


图2 滑坡平面形态示意图
Fig. 2 Schematic diagram of plane shape of landslide

石含量主要间于 55%~65%，且滑体土结构整体都较为松散，利于雨水入渗。

②滑带。岩性主要为粉质黏土夹砾石，主要呈软塑~可塑，强度相对较低，遇水易软化，隔水性也较强；砾石粒径主要间于 2~8 mm，次圆状为主，具有一定的定向排列特征。

③滑床。滑床岩性主要为灰岩，发育条件详见上节。

据上，将滑坡剖面结构示意图表示如图 3 所示。

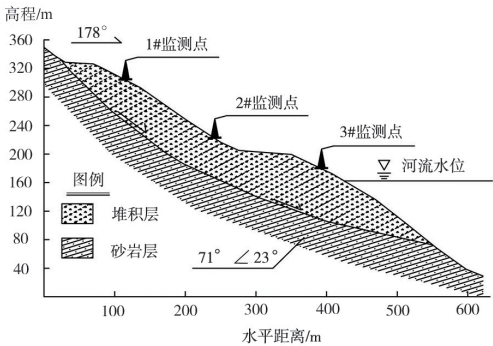


图3 滑坡剖面结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of landslide profile structure

2.1.3 滑坡变形特征

为定量评价滑坡变形特征，在滑坡上布置了 3 个监测点，具体位置如图 2 所示；以 1 次/4 d 的监测频率共计得到 42 期监测成果，其变形曲线如图 4 所示。据图 4，3 个监测点的累计变形大致具持续增加趋势，其中，1#监测点的累计变形已达 173.51 mm，2#监测点的累计变形已达 158.04 mm，3#监测点的累计变形已达 228.16 mm，说明滑坡前

缘的变形相对更大。

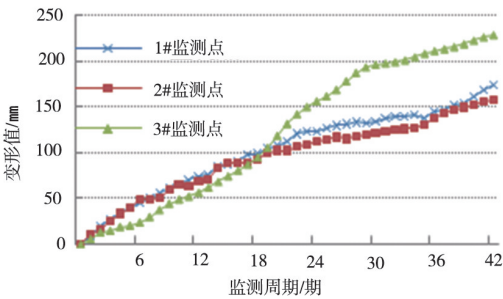


图4 滑坡变形曲线
Fig. 4 Landslide deformation curve

为进一步掌握滑坡变形特征，再对其变形速率特征进行统计，即：

1#监测点：变形速率的变化范围为-2.93~10.56 mm/期，平均值为 4.13 mm/期，方差值为 9.27 (mm/期)²。

2#监测点：变形速率的变化范围为-1.77~13.30 mm/期，平均值为 3.76 mm/期，方差值为 11.15 (mm/期)²。

3#监测点：变形速率的变化范围为 1.33~13.05 mm/期，平均值为 5.43 mm/期，方差值为 9.19 (mm/期)²。

据上，滑坡变形速率的变化范围相对较大，具有较强的波动性，充分说明该滑坡变形特征显著，开展后续稳定性评价是十分必要的。

2.2 滑坡稳定性评价分析

2.2.1 稳定性初步分析

为评价滑坡不同位置处的稳定状态，提出对图 2 中的 3 个剖面均进行传递系数法的稳定性评价，结果见表 2。据表 2，滑坡不同位置处的稳定性是不同的，其中，3 个剖面在不同工况条件下的稳定性由强至弱排序为：工况 1>工况 3>工况 2，说明暴雨工况是滑坡最不利工况，亦是其设计工况；同时，在相同工况条件下，3 个剖面的稳定性由强至弱排序为：剖面 3-3' >剖面 1-1' >剖面 2-2'，说明滑坡主滑面上的稳定性相对最弱，其次为滑坡右侧及左侧。

表 2 3 个剖面的稳定性初步计算结果
Table 2 Preliminary stability calculation results of three sections

工况	工况 1	工况 2	工况 3
剖面 1-1'	1.29	1.05	1.16
剖面 2-2'	1.25	1.04	1.14
剖面 3-3'	1.32	1.09	1.19

注：表中数字为稳定性系数 F_s 值

总体来说，在天然工况条件下，滑坡均处于稳定状态，但在不利工况条件下，尤其在暴雨工况条件下，滑坡处于欠稳定~基本稳定状态，具较大失稳风险，充分说明开展该滑坡稳定性研究必要性。

2.2.2 变形预测分析

按照论文思路，在前述滑坡稳定性初步评价基础上，该节再进一步利用变权重组合预测实现滑坡稳定性的后续发展趋势分析；同时，在该分析过程中，为充分验证预测模型构建过程的有效性，提出以 1#监测点为例，开展详述分析。

首先，计算得到 1#监测点在 4 个单项预测模型中的预测结果如表 3 所示。据表 3，4 个单项预测模型的预测结果存在一定差异，充分说明开展单项预测结果筛选的必要性，其中：

LSTM 模型：预测结果的相对误差范围为

3.05% ~ 3.30%，平均值为 3.20%，方差值为 0.0098 (%)²。

SVR 模型：预测结果的相对误差范围为 3.28% ~ 3.68%，平均值为 3.48%，方差值为 0.0306 (%)²。

XGBoost 模型：预测结果的相对误差范围为 3.11% ~ 3.33%，平均值为 3.26%，方差值为 0.0079 (%)²。

LightGBM 模型：预测结果的相对误差范围为 3.15% ~ 3.34%，平均值为 3.25%，方差值为 0.0052 (%)²。

据上，SVR 模型具有相对最大的相对误差均值及方差值，其预测精度及稳定性相对最差，因此，将其余 3 个单项预测结果作为后续变形组合预测的基础。

表 3 1#监测点的单项预测结果
Table 3 Single prediction results of 1 # monitoring point

监测 周期/期	变形值/mm	LSTM 模型		SVR 模型		XGBoost 模型		LightGBM 模型	
		预测值/mm	相对误差/mm	预测值/mm	相对误差/mm	预测值/mm	相对误差/mm	预测值/mm	相对误差/mm
38	152.52	147.70	3.16	147.06	3.58	147.46	3.32	147.64	3.20
39	154.11	149.03	3.30	148.44	3.68	149.06	3.28	148.98	3.34
40	161.08	155.86	3.24	155.80	3.28	155.81	3.27	155.80	3.28
41	168.24	162.76	3.26	162.67	3.31	162.64	3.33	162.94	3.15
42	173.51	168.22	3.05	167.37	3.54	168.11	3.11	167.82	3.28

其次，再利用遗传算法开展 1#监测点的变权重组合预测，结果如表 4 所示。据表 4，通过变权重组合预测，所得结果的相对误差范围为 2.06% ~ 2.23%，平均值为 2.13%，方差值为 0.0046 (%)²，与单项预测结果相比，预测精度得以明显提高，预测稳定性也略有提高，因此，充分说明变权重组合预测能有效提高预测效果，也验证了本文变权重组合预测模型的有效性。

表 4 1#监测点的变权重组合预测结果
Table 4 Prediction results of variable weight combination at 1 # monitoring point

监测 周期/期	变形值 /mm	单项预测结果			组合预测结果	
		预测值 1 /mm	预测值 2 /mm	预测值 3 /mm	组合值 /mm	相对误差 /mm
38	152.52	147.70	147.46	147.64	149.26	2.14
39	154.11	149.03	149.06	148.98	150.94	2.06
40	161.08	155.86	155.81	155.80	157.49	2.23
41	168.24	162.76	162.64	162.94	164.61	2.16
42	173.51	168.22	168.11	167.82	169.90	2.08

据上，已验证了变权重组合预测模型的有效

性，再利用其进一步开展其余监测点的预测分析，结果如表 5 所示。据表 5，3 个监测点的预测结果相当，其中：

1#监测点：预测结果的相对误差范围为 2.06% ~ 2.23%，平均值为 2.13%，方差值为 0.0046 (%)²。

2#监测点：预测结果的相对误差范围为 2.05% ~ 2.21%，平均值为 2.14%，方差值为 0.0035 (%)²。

3#监测点：预测结果的相对误差范围为 2.00% ~ 2.15%，平均值为 2.08%，方差值为 0.0034 (%)²。

据上，进一步验证了变形组合预测模型的预测效果相对较优，充分验证其在滑坡变形预测中的适用性，且各监测点的后续变形仍会进一步增加。

研究与应用

表 5 各监测点的最终预测结果
Table 5 Final prediction results of each monitoring point

监测周期/期	1#监测点预测结果			2#监测点预测结果			3#监测点预测结果		
	变形值/mm	预测值/mm	相对误差/mm	变形值/mm	预测值/mm	相对误差/mm	变形值/mm	预测值/mm	相对误差/mm
38	152.52	149.26	2.14	147.39	144.13	2.21	215.25	210.86	2.04
39	154.11	150.94	2.06	149.85	146.60	2.17	218.43	213.82	2.11
40	161.08	157.49	2.23	152.78	149.53	2.13	222.16	217.54	2.08
41	168.24	164.61	2.16	155.77	152.58	2.05	225.94	221.42	2.00
42	173.51	169.90	2.08	158.04	154.64	2.15	228.16	223.25	2.15
43	—	176.06	—	—	156.84	—	—	224.05	—
44	—	182.59	—	—	158.79	—	—	226.35	—
45	—	188.86	—	—	163.34	—	—	230.02	—
46	—	192.18	—	—	166.18	—	—	234.18	—

经统计,得到1#监测点至3#监测点的现有速率依次为:5.16 mm/期、2.63 mm/期及3.10 mm/期;预测速率依次为:5.57 mm/期、2.88 mm/期及2.73 mm/期;两者对比,除3#监测点的预测速率略小于现有速率外,其余2监测点均是预测速率略大于现有速率,充分说明滑坡后续变形趋于不利,即滑坡稳定性将趋于减弱。

2.2.3 稳定性综合评价

据上述滑坡稳定性的初步分析及后续发展趋势分析,主要得出:

①稳定性初步分析结果。在天然工况条件下,滑坡均处于稳定状态,但在不利工况条件下,尤其在暴雨工况条件下,滑坡处于欠稳定~基本稳定状态,具较大失稳风险。

②后续发展趋势分析结果。滑坡后续预测速率与现有速率相当,且有2个监测点的预测速率相对更大略大,即滑坡稳定性将趋于减弱。

综合上述,滑坡现有稳定性已较弱,后续仍会进一步减弱,建议尽快构建该滑坡防灾预案,切实防止其失稳后堵塞航道及影响周围居民的正常生活,切实保证安全。

3 结论与认识

通过对堆积层滑坡稳定性的综合评价分析,主要得出如下结论与认识:

(1) 滑坡变形特征显著,且通过传递系数法的初步稳定性分析,得出滑坡稳定性系数均大于1,在天然工况条件下,滑坡均处于稳定状态,但在不利工况条件下,滑坡具较大失稳风险。

(2) 变权组合预测模型在滑坡变形预测中具有较优的预测效果,其预测结果的相对误差均值均在2%左右,且其方差值也较小,即预测结果不

仅具有较优的预测精度,还具较优的稳定性;同时,预测结果显示,滑坡后续预测速率与现有速率相当,且1#监测点和2#监测点的预测速率还相对略大,说明滑坡稳定性将趋于减弱。

(3) 该文通过传递系数法和变权组合模型开展了滑坡稳定性的综合评价,建议后续可在此基础上,进一步结合滑坡地质条件,开展滑坡防治措施研究,以切实避免成灾损失。

参 考 文 献

[1] 吴丽丽,贺可强,全恩厚,等. 树坪滑坡切坡抗滑增稳优化治理数值模拟研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 158-165.

[2] 龚正峰. 三峡库区石榴树包滑坡地下水动态规律及变形响应机理研究[D]. 成都理工大学, 2020.

[3] 冉涛,陈浩,王羽珂,等. 工程开挖活动诱发堆积层滑坡变形机理及加固效果分析[J]. 地质与勘探, 2022, 58(6): 1236-1251.

[4] 汤罗圣,左清军,岳敏,等. 基于滑带完整性指标的三峡库区堆积层滑坡失稳破坏判据[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 77-84.

[5] 张佳佳,田允,陈龙,等. 澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2024-2033.

[6] 王占巍,赵发睿,谢文革,等. 青海省高家湾滑坡的形成条件分析及稳定性评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 81-87.

[7] 雷恒,周晓岚,王永强. 基于多重分形特征和分项组合预测联合响应的滑坡预警预测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(9): 885-891.

[8] 方筠,庞旭卿. 考虑数据去噪分解的滑坡位移组合预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 168-174.

[9] 彭亮,田浩,白刚刚,等. 基于优化组合预测模型的滑坡发展趋势评价[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(5): 1228-1235.

[10] 詹明强,陈波,刘庭赫,等. 基于变权重组合预测模型的混凝土坝变形预测研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 115-119.

[11] 王朝阳,李丽敏,温宗周,等. 基于时间序列和CNN-LSTM的滑坡位移动态预测[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(3): 1-8.