

引文格式:杜岩,宁利泽,谢漠文,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



Citation: DU Yan, NING Lize, XIE Mowen, 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

考虑时间滞后效应的库岸滑坡位移预测

杜 岩¹ 宁利泽¹ 谢漠文¹ 白云飞¹ 李 恒¹ 贾北凝²

1 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室,北京, 100083

2 建设部综合勘察设计研究院有限公司,北京, 100007

摘要:在库区滑坡位移预测预报研究中,库水位响应的滞后性使得传统滑坡位移预测模型难以分析单调增长的阶跃式变形特征,严重影响预测结果。基于此,在考虑库水位时间滞后效应基础上,建立了一套可应用于工程现场的自回归分布滞后位移预测模型,并在金沙江上游某库岸滑坡进行工程应用。工程研究案例得出,库水位上升、地震是该滑坡变形加剧的主要诱发因素,且库水位作用于滑坡变形的滞后天数为8天,新模型计算滑坡累积位移与实际位移相关系数高达0.9927,均方根误差为14.11 mm。此外,通过计算趋势速率比指标可以为滑坡监测预警提供新的敏感性评价参量。该研究不仅建立了一套具有物理意义的库岸滑坡位移预测模型,实现了滑坡位移的综合分析,而且实现了地震对滑坡位移演化贡献的定量计算,为蓄水期库岸滑坡演化全过程的安全风险管理提供了新的技术支持。

关键词:滑坡位移预测;时间滞后效应;自回归分布滞后模型;库水位;趋势速率比

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

收稿日期:2022-11-12

DOI:10.13203/j.whugis20220133

文章编号:1671-8860(2024)08-1347-09

A Prediction Model of Landslide Displacement in Reservoir Area Considering Time Lag Effect

DU Yan¹ NING Lize¹ XIE Mowen¹ BAI Yunfei¹ LI Heng¹ JIA Beining²

1 Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China

2 Comprehensive Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Ministry of Construction, Beijing 100007, China

Abstract: Objectives: In the research work of reservoir landslide displacement prediction, due to the lag of reservoir water level response, it is difficult for the traditional landslide displacement prediction model to analyze the monotonically increasing step deformation characteristics, which seriously affects the prediction results, and it is necessary to establish a landslide displacement prediction model that can consider the time lag effect. Methods: We analyze the time lag effect of reservoir levels separately through grey correlation, account for the cumulative effect of earlier rainfall, and consider the effect of earthquake on landslide deformation, and establish an autoregressive distributed lag landslide displacement prediction model that can be applied to engineering sites. Results: The results show that: (1) The engineering case study concluded that rising reservoir levels and earthquakes were the main triggering factors for the increased deformation of the landslide, and the lag time of reservoir levels acting on landslide deformation was 8 days. (2) The correlation coefficient between the cumulative landslide displacement and the actual displacement calculated by the new model is as high as 0.9927, with a root mean square error of 14.11 mm. (3) The calculation of trend speed ratio indicators can provide a new sensitivity evaluation parameter for landslide monitoring and early warning. Conclusions: The study establishes a physically significant prediction model for reservoir bank

基金项目:国家自然科学基金41702371);地表过程与资源生态国家重点实验室开放课题(2022-KF-01);中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDUEK2130)。

第一作者:杜岩,博士,副教授,主要从事防灾减灾方面的应用研究。mutulei@163.com

通讯作者:谢漠文,博士,教授。mowenxie@126.com

landslide displacements, provides a comprehensive analysis of landslide displacements, achieves a quantitative calculation of the seismic contribution to landslide displacement evolution, and provides new technical support for the safety risk management of the whole process of reservoir bank landslide evolution during the water storage period.

Key words: landslide displacement prediction; time lag effect; autoregressive distributed lag; reservoir level; trend speed ratio

大型水库蓄水后,库水位剧烈变动对库岸边坡的掏蚀、冲刷作用,使得斜坡岩土体参数下降,进而形成库岸滑坡,严重威胁库区人民的生命财产安全^[1]。作为滑坡稳定性评估和变形破坏预测的重要内容,库区滑坡的位移预测预报对于水利水电工程库区岸坡灾害防治具有重要的现实和理论意义^[2]。

20世纪60年代,Saito^[3]提出的三段图解法标志着滑坡预测预报研究正式开始,随着监测技术的提升和现代数学理论的发展,基于监测数据与数学理论耦合的模型成为了现今滑坡位移预测最主要的方法,从原有的单因素分析方法,诸如灰色系统模型(gray model, GM)^[4]、生物生长模型^[5-6]、黄金分割法^[7]、Voight模型^[8]、速程倒数法^[9]等,逐渐发展为考虑多因素指标的预测模型。如冯非凡等^[10]通过重标方差与长短记忆神经网络模型相结合定量预测了滑坡位移;鄢好等^[11]在考虑到降雨和库水位的影响下,采用时间序列与门控循环单元神经网络对八字门滑坡进行了预测;罗祎沅等^[12]将变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)与门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)结合进一步提高了预测模型的精度与时效性;安北等^[13]基于VMD-SES-BP模型为阶梯状滑坡位移预测提供了良好的适应性;徐峰等^[14]将GM(1,1)与自回归模型(auto regressive, AR)结合将滑坡位移分解分别进行预测;孟蒙等^[15]等基于H-P滤波法对滑坡位移进行了时序分解并进行预测。此类多因素预测方法较好地提高了预测精度,但这些方法多为不具有物理意义的数学统计模型,且未考虑库水位等因子的时间滞后效应,如当库水位发生突变,当期位移指标并未发生变异,而在随后的一段时间内发生变化,进而导致目前库岸滑坡的位移预测不能很好地捕捉滑坡系统的动态变化,很难被应用到库岸滑坡的预警预测与风险评价中。

库岸滑坡作为一个复杂系统,其变形受多方面因素的影响,且这些因素多有明显的滞后效应^[16]。因此,考虑多因素指标的影响并进行相应的时滞效应分析,建立具有实际物理意义的滑坡

位移预测模型,是未来库岸滑坡位移预测与风险管理的主要研究方向。为了更好地满足实际工程的需要,本文将滑坡位移分解为趋势项位移、周期项位移与随机误差分别进行分析,并以金沙江上游某库岸滑坡为应用案例,考虑库水位等多种外界因素及其时间滞后效应,建立一套具有实际物理意义的自回归分布滞后(auto regressive distributed lag, ARDL)预测模型,实现了蓄水期库岸滑坡位移的精细化预测,为库区滑坡安全风险管理提供新的技术支持。

1 方法原理

1.1 ARDL模型技术流程

图1为ARDL模型技术流程,具体为:(1)根据时间序列理论将滑坡位移进行分解;(2)选取合适的诱发因子(库水位、地震、降雨等),确定主导诱发因子库水位的滞后时间,建立考虑时滞效应的周期项位移预测模型;(3)确立趋势项位移自回归阶数,建立趋势项位移预测模型;(4)建立ARDL位移预测模型,并进行滑坡位移预测。

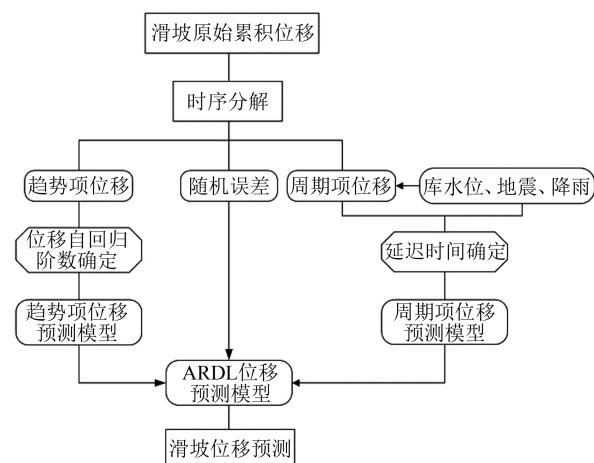


图1 考虑时滞效应的 ARDL 模型

Fig. 1 ARDL Model Considering Time Lag Effects

1.2 时滞效应分析

1) 库水位时滞效应模型

基于灰色关联分析原理^[17],可计算库水位等主要影响因素的滞后时间。假设滑坡累积位移

D_0 为:

$$D_0 = (D_0(1), D_0(2), \dots, D_0(n)) \quad (1)$$

库水位 H_0 为:

$$H_0 = (H_0(1), H_0(2), \dots, H_0(n)) \quad (2)$$

式中, n 为总监测天数。两时间序列长度相同, 且时距皆为 1 d。

为了消除不同量纲的影响, 分别对滑坡累积位移与库水位等指标进行零初始化处理:

$$D_1(j) = D_0(j) - D_0(1) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$H_1(k) = H_0(k) - H_0(1) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

取 m ($m < n$) 天的数据对累积位移与库水位进行绝对关联分析, 可得不同时滞时间对应的灰色绝对关联度:

$$\xi = \frac{1 + |s_0| + |s_1|}{1 + |s_0| + |s_1| + |s_1 - s_0|} \quad (5)$$

式中, ξ 为库水位与滑坡累积位移的灰色绝对关联度; s_0 为滑坡累积位移关联指标; s_1 为库水位关联指标。其中,

$$|s_0| = \left| \sum_{j=i+2}^{m+i-1} D_1(j) + \frac{1}{2} D_1(m+i) \right| \quad (6)$$

$$|s_1| = \left| \sum_{k=2}^{m-1} H_1(k) + \frac{1}{2} H_1(m) \right| \quad (7)$$

式中, i 为迟滞天数。根据灰色绝对关联度的计算公式, 当 $i=0$ 时, ξ 为当天库水位对应的灰色绝对关联度; 当 $i=1$ 时, ξ 为库水位时滞 1 天对应的灰色绝对关联度。根据式(5)~式(7), 可计算不同时滞时间对应的灰色绝对关联度。当计算所得的灰色绝对关联度最大时, 其对应时滞时间 i 即为库水位滞后时间。

由于库水位对于滑坡的滞后影响并非是一个线性过程^[18], 为简化这个过程, 引入影响系数 β , 设当考虑库水位滞后天数为 i 时, i 天前的影响系数为 β ($0 < \beta < 1$), β 值计算如下:

$$1 = \beta + \beta^2 + \beta^3 + \dots + \beta^i \quad (8)$$

则 t 天时当期等效库水位 H_t 为:

$$\bar{H}_t = \beta^i H_{t-i} + \beta^{i-1} H_{t-i-1} + \dots + \beta H_{t-1} \quad (9)$$

2) 降雨时滞效应模型

降雨对滑坡的影响依据是“一个降雨过程理论”, 即距离当次降雨时间越长的降雨, 其有效降雨会越来越小, 这是一个定向衰减过程。其衰减系数 α_T 可用下述公式计算^[19]:

$$\alpha_T = e^{-\frac{T}{4.34}} \quad (10)$$

式中, T 为前次降雨距当期的时间。

实际工程中由于需要考虑多次有效降雨量

的叠加, 故当期有效降雨量可表示为:

$$\bar{R}_t = \sum_{l=1}^{n-1} \alpha_{T_l} R(l) \quad (11)$$

式中, R_l 为当期有效降雨量; $R(l)$ 为第 l 天降雨的总降雨量; α_{T_l} 为第 l 天总降雨量对当期影响的衰减系数。

1.3 ARDL 位移预测模型

根据时间序列的加法模型, 滑坡位移可分为趋势项位移、周期项位移与随机误差, 表示如下:

$$D_t = T_t + F_t + \epsilon \quad (12)$$

式中, D_t 为预测的滑坡累积位移; T_t 为由于滑坡自身条件(如岩土体性质、地形地貌等因素)发生改变而引起的趋势项位移; F_t 为由于降雨、库水位变动、地震等外界诱因而引起的周期项位移; ϵ 为随机误差, 其表现为人类工程活动影响、风荷载等随机因素对滑坡的影响。

1) 趋势项位移预测

时间序列的趋势项代表着滑坡在较长时期内持续发展变化的一种趋向或状态。由于滑坡累计变形的趋势项保持着单调增长的过程, 因此历史观测值和未来值之间最简单的关系就是线性关系, 通过时间序列自身的历值拟合得到未来的趋势项位移, 即:

$$T_t = \omega_1 D_{t-1} + \omega_2 D_{t-2} + \dots + \omega_n D_{t-n} \quad (13)$$

式中, T_t 为 t 时刻滑坡的趋势项位移; ω 为影响系数; n 为天数; D_{t-n} 为 n 天前的滑坡位移量。

2) 周期项位移预测

滑坡系统的周期项位移主要来自周期性诱发因子, 典型的诱发因子库水位、降雨均具有一定的滞后性, 因此需计算考虑滞后效应后的等效因子, 而地震对滑坡的影响较为显著, 可视为当期作用, 因此一个考虑滞后效应后的滑坡周期项位移可表示为:

$$F_t = \phi_1 \bar{H}_t + \phi_2 M_t + \phi_3 \bar{R}_t \quad (14)$$

式中, F_t 为预测 t 时刻的滑坡周期项位移; H_t 为 t 时刻的等效库水位; M_t 为预测 t 时刻的震级; R_t 为 t 时刻的等效降雨量; ϕ 为当期影响系数。

3) ARDL 滑坡位移预测模型

由上述分析结果, 可得滑坡累计位移的 AR-DL 模型为:

$$D_t = \omega_1 D_{t-1} + \omega_2 D_{t-2} + \dots + \omega_n D_{t-n} + \phi_1 \bar{H}_t + \phi_2 M_t + \phi_3 \bar{R}_t + \epsilon \quad (15)$$

式中, D_t 为预测 t 时刻的滑坡累计位移; n 为趋势项自回归阶数; 其他参数含义同前。由于时滞效应, H_t 、 R_t 可分别通过式(9)、式(11)计算得到, M_t

则根据经验采用预测方式,对于位移自回归滞后阶数 n 以及式中各项系数,由赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)、施瓦兹准则(Schwarz criterion, SC)^[20]以及随机误差 ϵ 绝对值最小确定。当各模型随机误差相差不大时,以 AIC、SC 准则确定最优模型,反之亦然。

与传统神经网络等预测模型相比,该模型的优点是能反映滑坡累积位移量与各影响因子之间的物理关系,属于具有物理意义的动态分析模型^[21],且可以对库水位等主要影响因子的时滞效应进行分析,估算库水位影响的滞后期,因此可以广泛用于库岸滑坡位移的精细化预测与风险评价。

2 工程案例

2.1 工程概况

金沙江上游某滑坡位于小江支库右岸王家山北侧,距离坝址 92.4 km,滑坡体积 611 万 m^3 。水库蓄水后,滑坡在特定工况下失稳,将会产生涌浪,不仅影响周边居民的生命和财产安全,同时可能会影响航运交通安全。

金沙江滑坡地处青藏高原东侧,由于海拔差异较大,具有高原季风立体气候特征,南北降雨分布不均,滑坡地处南部,干旱时有发生。滑坡发生加速变形阶段的 8 月底至 10 月降雨总共 8 次,其中大部分降雨在 1.0 mm 以下,超过 10 mm 的降雨 1 次,超过 20 mm 的中雨 1 次,因此暂不考虑降雨的影响。

2.2 外界诱发因子提取

1) 库水位变动

在大型水利水电工程蓄水过程中,库区滑坡演化直接受控于水库的蓄水过程。库水位的变化打破了原有的滑坡体与外界地下水渗流的动态平衡,系统达到新的动态平衡需要一定的时间,则表现为滑坡体内浸润面的涨落明显滞后于库水位的涨落。在蓄水期间,库水位的快速上升导致边坡岩土体的浸水面积增加,滑动面上的有效应力降低,从而加剧了滑坡的变形^[22]。此时,库水位的上升对滑坡位移的滞后性影响主要来源于两个方面:一是赋存在滑带的地下水对滑动面的软化作用是一个复杂的物理和化学过程,需要一定的时间来逐步完成;二是库水位上升导致库岸边坡体内浸润面上升,也存在一定的时间滞后性。因此,滑动面软化的物理和化学过程的滞后以及坡体内水位变化的滞后等多种因素耦合

造成了滑坡变形必然对蓄水响应有一定滞后^[23]。从时间上来看,金沙江滑坡从 7 月—10 月滑坡累计位移增加至 10 701.94 mm。其间根据滑坡位移速率的变化可分为两个阶段,其中 7 月—8 月为第一阶段,日平均速率为 3.07 mm/d,可以认为滑坡处于孕育阶段;9 月—10 月,随着库水位的不断上涨,位移速率出现较大的增幅,滑坡日最高位移速率可达 578.39 mm/d,且表现出库水位变化滞后于位移速率变化现象,如图 2 所示。

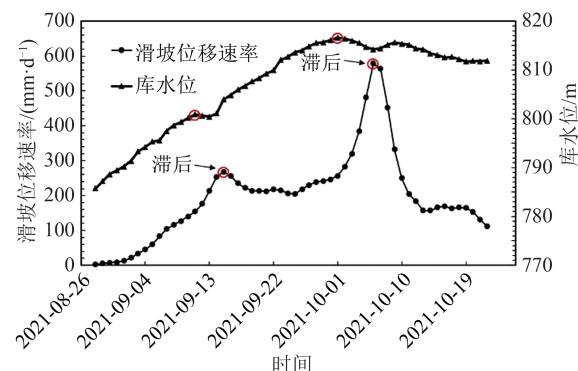


图 2 库水位与滑坡位移速率关系图

Fig. 2 Plot of Reservoir Water Level Elevation Versus Landslide Displacement Velocity Rate

2) 地震影响

地震导致的滑动面动摩擦力退化、土体抗剪强度降低以及惯性力作用是滑坡发生的重要原因^[24],滑坡地处小江地震带上,小震时有发生,当地震发生时,坡体内部拉陷槽不断拉大,在后缘静水压力作用下致使滑坡稳定性继续降低,滑坡位移进一步增大,因此频发地震导致滑坡的变形累积不容忽视^[25]。

3 位移预测与应用分析

3.1 库水位滞后时间计算结果

取考虑滞后 0~12 d 的库水位数据与滑坡位移数据,通过式(5)得到最大绝对灰色关联度 ζ ,对应滞后天数为 8 d,计算结果如表 1 所示。

将滞后期为 8 d 对应的库水位数据代入式(9)将其转化为等效库水位,转换后的库水位与滑坡位移速率对比如图 3 所示。

由图 3 可知,考虑时滞效应的等效库水位较好地判断了滑坡位移速率的变化情况,相关系数也由原来未考虑时滞效应的 0.674 2 上升到 0.701 5。

3.2 趋势项位移自回归阶数

得到等效库水位后,代入数据并进行零初始化处理,对序列差分平稳后的 D_1 进行自回归分

表1 灰色绝对关联度

Tab. 1 Gray Absolute Correlation Degree

滞后天数 n/d	灰色绝对 关联度 ζ	滞后天数 n/d	灰色绝对 关联度 ζ
0	0.554	7	0.573
1	0.557	8	0.574
2	0.560	9	0.572
3	0.563	10	0.572
4	0.565	11	0.571
5	0.568	12	0.570
6	0.571		

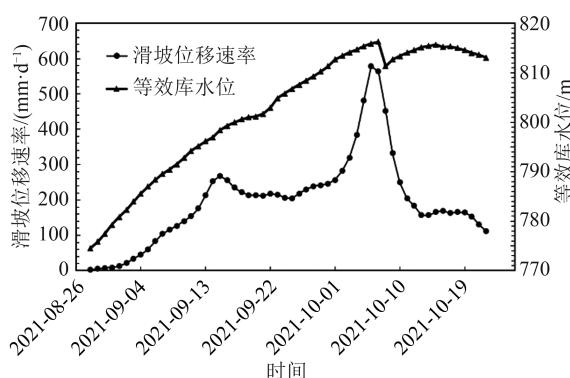


图3 等效库水位与滑坡位移速率关系图
Fig. 3 Equivalent Reservoir Level Versus Landslide Displacement Velocity Rate

析,基于AIC、SC判别准则,通过比较不同模型的拟合优度来确定合适的自回归阶数。表2为趋势项位移自回归阶数计算结果。由表2可知,对于2、3、4阶回归项来说,随机误差相差不大,不到滑坡累计位移的1%,而AIC、SC准则在2阶时最小,因此建立2阶趋势项位移预测模型最优。

表2 趋势项位移自回归阶数计算结果

Tab. 2 Calculation Results of the Autoregressive Order of the Trend Term Displacement

阶数	AIC	SC	随机误差
1	10.02	10.09	-85.568
2	8.37	8.56	-15.464
3	8.48	8.63	-13.905
4	8.99	9.10	-5.180

3.3 ARDL滑坡位移预测模型

将考虑时滞效应的周期项位移预测模型与2阶趋势项位移预测模型汇总,可建立ARDL滑坡位移预测模型,取前45天的数据进行零初始化处理,以消除量纲的影响,并加入库水位、震级等诱发因子数据作为自变量。其中对于地震数据的处理,以3.0级地震为界限,当震级小于3.0时称为弱震^[26],这种地震人们一般不易察觉,则认为

对滑坡未构成危害(记为0);当震级大于3.0时称为有感地震,可认为将对滑坡造成威胁。取前45 d的数据作为样本数据,由式(15)最终得到ARDL预测模型为:

$$D_t = 1.894D_{t-1} - 0.898D_{t-2} + 2.286\bar{H}_t + 5.073M_t - 15.464 \quad (16)$$

由式(16)可知,2阶趋势项位移模型的影响因子分别为1.894与0.898,库水位、震级影响因子分别为2.286、5.073。

将该模型应用到现场对10月13日后的监测数据进行预测,并与实际位移进行对比,由图4可知,该模型的预测结果与实际结果基本吻合。

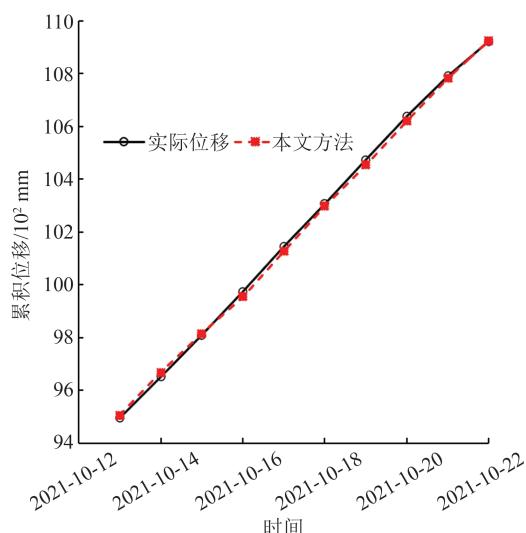


图4 滑坡预测累积位移与实际累积位移对比图

Fig. 4 Comparison of Predicted Cumulative Landslide Displacements with Actual Cumulative Displacements

3.4 与传统模型方法对比分析

为验证模型的可靠性,将本文方法依次与自回归移动平均模型(autoregressive integrated moving average model, ARIMA)直接预测方法^[27]、VMD与GRU耦合法^[12]、二次移动平均(second moving average, SMA)与ARIMA耦合法^[28]进行比较,图5为4种方法预测结果与实际位移的对比图。

由图5可知,采用ARIMA模型在短期内预测效果不错,但往后预测误差明显偏大;VMD与GRU耦合的方法在精度上有了明显的提升,但在后期真实值与预测值存在一定差距;通过SMA剔除趋势项位移,进而采用ARIMA对周期项位移进行预测,总体效果不错,但仍然存在后期误差较大的问题。相较于前3种方法,考虑到库水位时滞效应的ARDL预测模型精度更高,能更好地对滑坡位移进行精细化预测。图6为4种方法

评价指标对比图,可知考虑时滞效应的ARDL预测模型在4种方法中是最优的,拟合优度 R^2 为0.9927,均方根误差(root mean square error, RMSE)为14.11 mm。

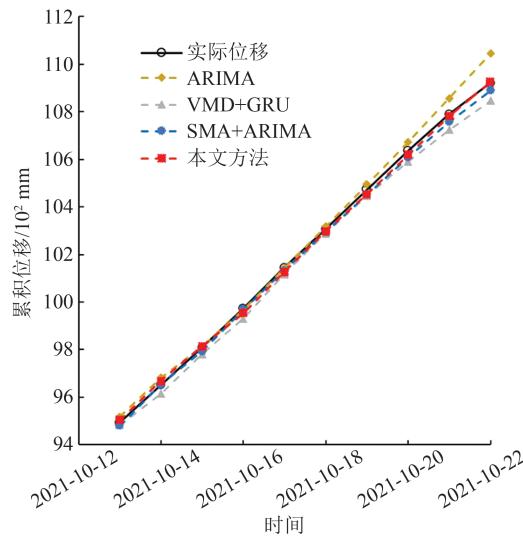


图5 4种方法预测位移与实际位移对比图

Fig. 5 Comparison of Predicted and Actual Displacements of Four Methods

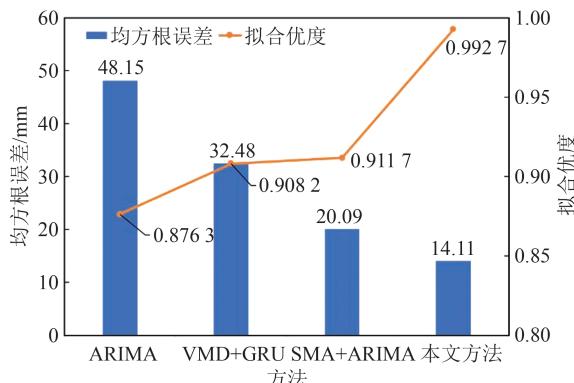


图6 4种方法评价指标对比图

Fig. 6 Comparison of Evaluation Indicators of Four Methods

4 讨论

4.1 滑坡位移趋势项分析

与其他滑坡位移预测模型相比,本文提出的模型在保证预测精度与时效性的前提下,计算出了外界诱因的影响参数,赋予了模型一定的物理意义,为研究蓄水期库岸滑坡演化全过程的作用机理提供了有效参考。

趋势项位移预测模型进行简单变换后,可得:

$$D_t - D_{t-1} = 0.89(D_{t-1} - D_{t-2}) \quad (17)$$

由式(17)可得,滑坡当日位移速率与前日位移速率呈0.89倍递减,表明滑坡在蓄水期间位移

逐渐呈稳定态势,事实也证明该滑坡在整个蓄水期间,虽然累积位移很大,但位移速率还是逐渐衰减,并最终趋于稳定状态。因此定义该系数为趋势速率比,即计算区间内位移速率衰减(增大)趋势的比值,当该系数大于1时,表明滑坡位移增大趋势明显;反之则表明滑坡位移衰减趋势明显。进一步对10月12日-21日滑坡的趋势速率比进行计算分析,结果如表3所示。

表3 趋势速率比计算结果

Tab. 3 Displacement Trend Rate Ratio

时间	位移速率/(mm·d ⁻¹)	趋势速率比
2021-10-12	183.32	0.84
2021-10-13	156.99	0.88
2021-10-14	157.34	1.03
2021-10-15	165.59	0.74
2021-10-16	169.77	0.65
2021-10-17	162.76	0.57
2021-10-18	165.76	0.49
2021-10-19	164.49	0.42
2021-10-20	153.06	0.33
2021-10-21	130.58	0.49

由表3可知,该期间内的平均趋势速率比大都在1.0以下,10月18日后更是下降到0.5以下,虽然位移指标仍保持较大的数值,但趋势速率比结果表明该滑坡位移将出现整体趋稳态势。因此,趋势速率比可以作为库岸滑坡风险预警预测的一个有效指标,实现对蓄水期发生较大变形的库岸滑坡风险分析与失稳预测。

图7为基于趋势速率比与位移速率比模型(双速率比模型)蠕滑型滑坡风险预警分析。由图7可知,滑坡从10月3日-6日上升到最大,为578.39 mm/d,随后又降低到10月9日的332.68 mm/d,并逐渐趋于稳定。位移速率比由于是根据当期滑坡变形V-T曲线分析的,表现出的拐点与位移数据相符,都在10月6日出现拐点,无法提前反映滑坡位移的趋势变化^[29];而趋势速率比则综合考虑之前的历史累积位移数据,可提前在10月5日出现拐点。相对于传统的单位速率比模型,这套双速率比滑坡风险预警模型时效性更强,更有利实现对滑坡稳定性风险的识别评价,进而为库岸滑坡现场的安全风险管理提供新的技术支持^[30]。

4.2 地震位移占比影响

前人的研究中往往忽略了地震的影响,将地震的影响列为随机误差项,而本预测模型则综合

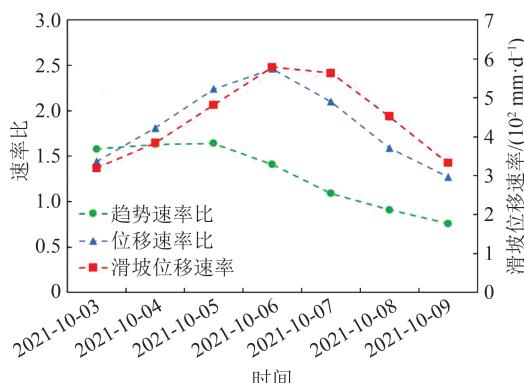


图7 双速率比模型预警分析图

Fig. 7 Early Warning Analysis Diagram of Dual Speed Ratio Model

考虑了地震诱发因子作用。在该滑坡预测模型中,当期地震影响因子达到了5.07,不可忽略。为了验证地震对滑坡位移数据的影响,通过提取地震局数据与滑坡位移变形速率增幅较大的3日数据进行对比,分析结果如表4所示。

表4 地震与滑坡位移速率对比

Tab. 4 Comparison of Earthquake and Landslide Displacement Velocity Rate

时间	震级	位移速率/ (mm·d⁻¹)	较前一天位 速速率倍数
2021-09-03	5.2	33.85	1.63
2021-09-14	3.7	253.90	1.18
2021-10-05	3.2	482.01	1.25

由表4可知,当地震发生时,滑坡位移速率发生明显加速。为更直观地探究当期地震对于滑坡位移的影响占比,本文选取了震级最大的日滑坡位移数据进行分析,结果如图8所示。

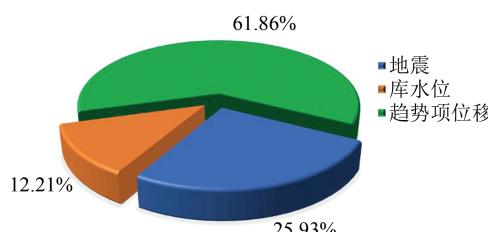


Fig. 8 Analysis of the Proportion of Displacement Affected by a Magnitude 5.2 Earthquake

由图8可知,当滑坡区域发生5.2级地震时,当期地震对于滑坡位移的影响达到了25.93%。因此,在频发微震的滑坡区域,尤其是当期地震震级较大时,其影响不可忽略,在今后的滑坡位移预测中需要对其进行重点研究。

5 结语

本文在考虑到库水位响应滞后性的前提下,同时将地震信息纳入灾害诱发因子,建立了ARDL位移预测模型,并得出了滑坡位移速率与库水位、地震之间的理论关系,通过曲线拟合验证了模型的可行性。主要得出以下结论:

- 金沙江滑坡作为非降雨诱发型库区滑坡,其位移变化主要由地质环境的变化、库水位、地震等因素综合作用导致,其中库水位、地震为主导诱发因素,通过灰色绝对关联度计算出库水位响应滞后时间为8 d。
- 通过与ARIMA模型、VMD+GRU模型与SMA+ARIMA模型等3种传统位移预测模型进行对比,考虑时滞效应的ARDL位移预测模型为4种方法中最优的,拟合优度 R^2 达到了0.9927, RMSE为14.11 mm,实现了蓄水期库岸滑坡位移的精细化预测。

3)通过对预测公式中自回归项位移部分进行变换发现,滑坡的趋势速率比为0.89;对预测的10日内滑坡实际位移速率进一步分析发现,该指标可有效预测未来滑坡的稳定性。因此,趋势速率比模型可与原有位移速率比模型一起为库岸滑坡的风险管理提供新的技术支持。

4)由地震局数据可知,金沙江滑坡所处位置频发微震,通过将地震作用考虑进入滑坡诱发因子发现,当日地震影响位移占比最多可达25.93%,因此对于频发地震的滑坡地带,地震是库岸滑坡位移预测必须要考虑的诱发因素之一。

参 考 文 献

- [1] Tang Chuan, Zhu Jing. Study on Landslide and Debris Flow in Yunnan [M]. Beijing: The Commercial Press, 2003. (唐川, 朱静. 云南滑坡泥石流研究 [M]. 北京: 商务印书馆, 2003.)
- [2] Xu Qiang, Huang Runqiu, Li Xiuzhen. Research Progress in Time Forecast and Prediction of Landslides [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 478-483. (许强, 黄润秋, 李秀珍. 滑坡时间预测预报研究进展 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 478-483.)
- [3] Saito M. Forecasting Time of Slope Failure by Tertiary Creep [J]. Journal of Japan Landslide Society, 1968, 4(3): 1-8.
- [4] Gao W. Study on Displacement Prediction of Landslide Based on Grey System and Evolutionary Neural Network [C]//Computational Methods in Engineering

- & Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 275-275.
- [5] He Xiaohei. An Improved Pearl Model for Landslide Forecast and Its Application[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 91-95. (贺小黑. 滑坡预测预报中改进的Pearl模型及其应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 91-95.)
- [6] Long Wanxue, Lin Jian, Xu Xianghua, et al. Selection of Initial Prediction Time for Landslide with Verhulst Inverse Function Model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 3298-3304. (龙万学, 林剑, 许湘华, 等. Verhulst反函数模型滑坡起始预测时刻的选择[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3298-3304.)
- [7] He Keqiang. Study on Displacement Information Analysis and Instability Trend Criterion of Cumulative Landslides — A Case Study of Typical Cumulative Landslides in the Three Gorges Area of the Yangtze River[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (贺可强. 堆积层滑坡位移信息分析与失稳趋势判据的研究:以长江三峡区典型堆积层滑坡分析为例[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2003.)
- [8] Voight B. A Method for Prediction of Volcanic Eruptions[J]. *Nature*, 1988, 332: 125-130.
- [9] Ma Haitao, Zhang Yihai, Yu Zhengxing. Research on the Identification of Acceleration Starting Point in Inverse Velocity Method and the Prediction of Sliding Time [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 355-364. (马海涛, 张亦海, 于正兴. 滑坡速度倒数法预测模型加速开始点识别及临滑时间预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 355-364.)
- [10] Feng Feifan, Wu Xueling, Niu Ruiqing, et al. A Landslide Deformation Analysis Method Using V/S and LSTM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 784-790. (冯非凡, 武雪玲, 牛瑞卿, 等. 一种V/S和LSTM结合的滑坡变形分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(5): 784-790.)
- [11] Yan Hao, Chen Jiaorui, Li Shaohong, et al. Predicting of Landslide Displacement Based on Time Series and Gated Recurrent Unit[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(1): 102-107. (鄢好, 陈骄锐, 李绍红, 等. 基于时间序列和GRU的滑坡位移预测[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 102-107.)
- [12] Luo Huiyuan, Jiang Yanan, Xu Qiang, et al. Displacement Prediction of Reservoir Bank Landslide Based on Optimal Decomposition Mode and GRU Mode [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(5): 702-709. (罗袆沅, 蒋亚楠, 许强, 等. 最优分解模态和GRU模型的库岸滑坡位移预测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(5): 702-709.)
- [13] An Bei, Jiang Yanan, Zeng Qifei. Prediction of Landslide Displacement Based on Grey Relational Analysis and VMD-SES-BP Model[J]. *Pearl River*, 2021, 42(1): 34-40. (安北, 蒋亚楠, 曾启菲. 基于灰色关联分析联合VMD-SES-BP模型的滑坡位移预测[J]. 人民珠江, 2021, 42(1): 34-40.)
- [14] Xu Feng, Wang Yang, Du Juan, et al. Study of Displacement Prediction Model of Landslide Based on Time Series Analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(4): 746-751. (徐峰, 汪洋, 杜娟, 等. 基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 746-751.)
- [15] Meng Meng, Chen Zhiqiang, Huang Da, et al. Displacement Prediction of Landslide in Three Gorges Reservoir Area Based on H-P Filter, ARIMA and VAR Models[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 552-560. (孟蒙, 陈智强, 黄达, 等. 基于H-P滤波法、ARIMA和VAR模型的库区滑坡位移综合预测[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 552-560.)
- [16] Min Hong, Tan Guohuan, Dai Fuchu, et al. Hydrodynamic Monitoring of a Preexisting Landslide During Reservoir Filling: A Case History of Xietan Landslide, the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3721-3726. (闵弘, 谭国焕, 戴福初, 等. 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应监测:以三峡库区泄滩滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3721-3726.)
- [17] Liu Sifeng, Dang Yaoguo, Fang Zhigeng. Grey System Theory and Its Application [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2004 (刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2004)
- [18] Xiang Jiasong, Wen Baoping, Chen Ming, et al. Activity Response of a Landslide with Complex Structure to Fluctuation of Reservoir Water Level: A Case Study of the Chaiwan Landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 71-77. (向家松, 文宝萍, 陈明, 等. 结构复杂滑坡活动对库水位变化的响应特征:以三峡库区柴湾滑坡为例[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 71-77.)

- [19] Huang Xiaohu, Lei Dexin, Xia Junbao, et al. Forecast Analysis and Application of Stepwise Deformation of Landslide Induced by Rainfall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3585–3592. (黄晓虎, 雷德鑫, 夏俊宝, 等. 降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3585–3592.)
- [20] Coondoo D, Dinda S. Causality Between Income and Emission: A Country Group-Specific Econometric Analysis [J]. *Ecological Economics*, 2002, 40(3): 351–367.
- [21] Charemza W W, Deadman D F. New Directions in Econometric Analysis [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [22] Chen Xianggui, Niu Jiandong, Chen Liangjing. Seepage Field and Stability Analysis of Landslide Under the Condition of Reservoir Water Level Rising [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2013, 10(3): 76–81. (陈湘桂, 牛建东, 陈亮晶. 库水位上升条件下滑坡体的渗流场及稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(3): 76–81.)
- [23] Liu Caihua, Chen Congxin, Feng Xiating. Study on Mechanism of Slope Instability Due to Reservoir Water Level Rise [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(5): 769–773. (刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 769–773.)
- [24] Huang D, Song Y X, Ma G W, et al. Numerical Modeling of the 2008 Wenchuan Earthquake-Trig-gered Niumiangou Landslide Considering Effects of Pore-Water Pressure [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4713–4729.
- [25] Jiang Jiwei, Pan Jiajun, Zhang Wei. Research on the Deformation Characteristics of Typical Accumulative Landslide in the Three Gorges Reservoir Un-
der Earthquakes [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(S2): 142–146. (江泊清, 潘家军, 张伟. 地震作用下三峡库区典型堆积层滑坡变形特性研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(S2): 142–146.)
- [26] China Earthquake Administration. GB 17740—2017 [S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China, 2017. (中国地震局. GB 17740—2017[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.)
- [27] Duan Gonghao, Niu Ruiqing, Peng Ling, et al. A Landslide Displacement Prediction Research Based on Optimizationparameter ARIMA Model Under the Inducing Factors [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 531–536. (段功豪, 牛瑞卿, 彭令, 等. 诱发因素影响下的滑坡参数优化预测模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(4): 531–536.)
- [28] Lei Dexin, Yi Wu. Prediction and Forecast of Landslide Displacement Based on ARIMA Model: Case of Wangjiapo Landslide in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(21): 56–60. (雷德鑫, 易武. 基于ARIMA时间序列模型的滑坡位移预测预报: 以三峡库区王家坡滑坡为例[J]. 人民长江, 2018, 49(21): 56–60.)
- [29] Wang Liwei, Xie Mowen, Chai Xiaoqing. Research on Method of Displacement Speed Ratio for Spatial Evaluation of Landslide Deformation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 519–528. (王立伟, 谢漠文, 柴小庆. 滑坡变形空间评价的位移速率比方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 519–528.)
- [30] Du Y, Ning L Z, Chicas S D, et al. A New Early Warning Criterion for Assessing Landslide Risk [J]. *Natural Hazards*, 2023, 116(1): 537–549.