

古滑坡肇灾演化流程分析及稳定性评价

Analysis of the Evolution Process and Stability Evaluation of Ancient Landslides Causing Disasters

苗元亮, 张书坤, 孟 超

(山东水总有限公司, 济南 250014)

摘 要: 为准确掌握特殊型古滑坡的肇灾演化流程及稳定状态, 基于古滑坡所处地质条件及基本特征, 开展其肇灾影响因素分析和演化过程分析; 以滑坡变形监测数据为基础, 在剔除滑坡变形数据中随机噪声的基础上, 通过尖点突变分析和多重分形去趋势波动分析分别开展滑坡稳定性现状评价及发展趋势评价。结果表明: 古滑坡肇灾影响因素较为完备, 其演化过程主要包括古滑坡前期形成期及临近复活期, 演化过程阶段较为清晰; 同时, 通过尖点突变分析, 各监测点的突变特征值均大于 0, 滑坡现状稳定性均属稳定状态; 多重分形去趋势波动分析结果显示, 各监测点的传统 Hurst 指数均大于 0.5, 说明滑坡累计变形仍会进一步增加, 稳定性均趋于不利方向发展, 应尽快开展滑坡防治。研究成果可为类似工程提供参考与借鉴。

关键词: 古滑坡; 肇灾影响因素; 肇灾演化流程; 稳定性评价; 发展趋势

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0084-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.016

MIAO Yuanliang, ZHANG Shukun, MENG Chao

(Shandong Water Conservancy Group Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: To accurately grasp the disaster initiation and evolution process and stable state of special ancient landslides, based on the geological conditions and basic characteristics of the ancient landslides, carry out analysis of their disaster initiation influencing factors and evolution process; Based on landslide deformation monitoring data, after removing random noise from landslide deformation data, the stability status evaluation and development trend evaluation of landslides are carried out through sharp point mutation analysis and multifractal trend fluctuation analysis, respectively. The results indicate that the influencing factors of ancient landslides are relatively complete, and their evolution process mainly includes the early formation period and the near revival period of ancient landslides, with clear stages of the evolution process; Meanwhile, through sharp point mutation analysis, the mutation characteristic values of each monitoring point are all greater than 0, indicating that the stability of the landslide is in a stable state; The results of multifractal detrended fluctuation analysis show that the traditional Hurst exponent of each monitoring point is greater than 0.5, indicating that the cumulative deformation of the landslide will continue to increase and the stability will tend to develop in an unfavorable direction. Therefore, landslide prevention and control should be carried out as soon as possible. The research results can provide reference and inspiration for similar projects.

Key words: ancient landslide; impact factors of disaster; disaster causing evolution process; stability evaluation; development trend

0 引言

近年,随着水利大坝等工程修建,库区水位不仅上升,还存在周期性波动,诱发复活了一些特殊型古滑坡,如顺层深层岩质古滑坡。为切实保证古滑坡区内居民生产生活安全,开展此类滑坡的肇灾演化流程分析及稳定性评价具有重要意义^[1-2]。

目前,谭琳等^[3]开展了深海古滑坡的启动机制研究,卫童瑶等^[4]分析了古滑坡复活后的变形规律,何坤等^[5]、黄达等^[6]研究了古滑坡复活成因及机理。有些学者开展古滑坡稳定性评价,丁保艳等^[7]证明了滑坡稳定性研究的重要性,宁波等^[8]提出通过滑坡变形监测数据构建顺层深层岩质古滑坡的稳定性评价模型,且为保证分析过程的完整性,将稳定性分析过程划分为现状稳定性评价和稳定性发展趋势评价;另外,赵淑敏^[9]研究表明滑坡变形监测数据中含有随机噪声,会对分析结果造成一定影响,提出在开展古滑坡稳定性分析前,先进行变形数据的去噪处理。王晨辉等^[10]的研究成果显示,经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)具有良好的数据去噪效果。因此,可以其为基础构建数据去噪模型;且结合使用经验,EMD分解过程中易出现端点效应及模态混叠问题,为解决该问题,对EMD模型进行了改进,如EEMD模型有效削弱了模态混叠问题,CEEMD模型又有效改善了端点效应^[11]。但这两种模型均未有效解决噪声附加模态问题,为克服该问题,熊春宝等^[12]进一步构建了自适应噪声的完备集合经验模态分解模型,即CEEMDAN模型,该模型不仅能克服模态混叠问题,还能保持更优的重构误差。CEEMDAN模型虽具较优分解效果,但其模型结构相对单一,且忽略了滑坡监测数据的多路径偏差影响,因此,在进行CEEMDAN模型分解处理前,可先采用Chebyshev滤波进行预先处理,以消除变形数据的多路径偏差。

为确保滑坡稳定性后续分析结果的准确性,仅以滑坡真实变形信号进行滑坡稳定性分析。邓小鹏^[13]、田成成等^[14]研究表明尖点突变分析属新型标度指数算法,能有效实现滑坡稳定性现状评价;常瑶^[15]研究得出多重分形去趋势波动分析法(Multi-fractal Detrended Fluctuation Analysis, MF-DFA)能

评价滑坡变形的多重分形特征及发展趋势,两者具有一定的互补性,可以此两种方法开展滑坡稳定性的联合分析。

综上所述,基于古滑坡所处地质条件及基本特征,开展肇灾影响因素分析和演化过程分析。利用经验模态分解、多重分形去趋势波动分析等开展滑坡稳定性评价,为后期防治提供一定的理论指导。

1 工程概况

1.1 滑坡形态及规模

滑坡平面具“扇形”特征(如图1所示),后缘以裂缝发育为界,左、右两侧以冲沟发育,前缘以长江为界,边界特征明显;同时,滑坡主滑方向约30°,纵向长约700 m,宽度具前宽后窄,最大宽度约1 400 m,面积约 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^2$,厚度亦随位置不同而差异较大,平均厚度约80 m,体积约 $1.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

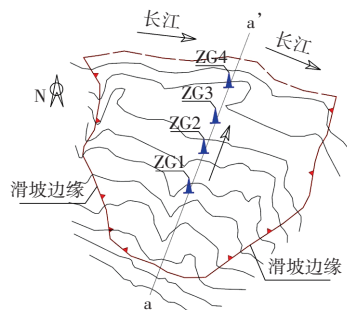


图1 滑坡平面分布图

Fig. 1 Plane distribution of landslide

在滑坡物质组成方面,滑体土具分层结构特征,其上层地层由碎块石、粉质黏土及碎石土,其下层地层主要为炭质页岩;滑带土主要为软化后的炭质页岩;滑床亦具两层结构,其上是炭质页岩,其下是粉砂岩。

1.2 滑坡变形特征

该滑坡形成时间早于全新世,因此,该滑坡具古滑坡特征,故而将其变形特征描述过程划分为两步。

(1) 古滑坡残留变形特征 在滑坡左侧边界冲沟内可见古滑坡擦痕;滑坡后部完整性较好,但前缘较为破碎,并具岩层反翘特征。滑坡区后缘岩层倾角与前缘倾角并不一致,具逐步变化特征,且滑坡前缘深层探槽内,滑带下还具冲积层堆积物,亦是古滑坡存在的验证。

(2) 复活期变形特征 该滑坡近期变形记录最

岩土力学

早可追溯至上世纪 70 年代,主要表现为前缘临江面的局部垮塌,坡体亦局部发育裂缝,但后期多自动闭合。2003 年后,该滑坡变形较为明显,前缘垮塌不仅加剧,后缘也出现较大裂缝,宽度达 2 m;其后,每年雨季均有相应变形,主要表现为区内公路错断裂缝、边界裂缝及树木倒塌等。

总体来说,滑坡复活期变形特征显著,主要以边界变形为主,局部有垮塌或裂缝等。

2 古滑坡肇灾演化流程分析

2.1 肇灾内部因素

(1) 地形地貌因素。滑坡区地形斜坡坡度在 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间,且地表沟壑发育,破坏了地表完整性,一方面,有利于降雨入渗,会减弱滑带抗剪强度,并附增孔隙水压力,这不仅会减弱抗滑力,还会增加下滑力;另一方面,由于沟壑存在,在强降雨作用下,沟道流水会冲刷两侧或沟底堆积物,造成坡体局部垮塌;同时,由于滑坡前缘临空,受长江流水常年淘蚀,不仅会使其局部失稳垮塌,还会一定程度上减弱滑坡抗滑力,不利于滑坡稳定。

(2) 地层岩性因素。滑坡滑体土结构较为松散,降雨易入渗,且下部滑带及滑床地层具有较强的隔水性,使雨水汇集于滑带附近,长期软化其强度,且受下部地层隔水条件的差异影响,古滑坡具局部复活变形特征。

(3) 地质构造因素。地质构造直接影响古滑坡所处区域的地形地貌及地层特征;同时,滑坡区不仅存在两条较大的断裂构造,还发育有较多次生构造,这会极大程度上减弱坡体完整性,利于降雨入渗。

2.2 肇灾外部因素

(1) 地震因素。地震作用会在滑坡坡体内产生巨大的波动,形成新的节理裂隙,且波动亦会产生局部坡体变形,诱使古滑坡复活。

(2) 人类工程活动因素。滑坡区内居民生产、生活活动相对较多,主要表现为房屋修建、农业耕种及道路修建等,此类活动一方面会局部改变坡体原始地形地貌,另一方面也会一定程度上改变坡体内的水力联系,进而不同程度地改变滑坡稳定参数。

(3) 水力作用因素。滑坡区地表水主要是前缘长江,其周期性升降会对坡体前缘稳定造成较大影

响,主要表现为前缘抗剪能力减弱及局部垮塌,且此类影响具有周期性,会使坡体前缘稳定性出现周期性变化,最终造成其疲劳破坏。同时,降雨条件下,滑坡地表也会形成径流,其规律性差,但会较大程度上影响地表局部稳定。

据上,古滑坡肇灾影响因素较多,其复活是在内外两类营力作用下耦合促成,其中,肇灾内部因素是古滑坡复活的固有因素,肇灾外部因素是古滑坡复活的诱发因素。

2.3 肇灾演化过程分析

在肇灾影响因素分析基础上,开展其演化过程分析,具体如下:

(1) 滑坡形成初期,其所处坡体虽较长,但其前缘较为稳定,有效保证了滑坡整体稳定性;随时间持续,长江不断下切,致使坡体内部应力调整,加之在炭质页岩内发育有软弱夹层,具滑面形成的征兆。

(2) 随着时间持续,滑坡后缘变形显著,前缘不断隆起,潜在滑面亦逐步形成,直至滑面贯通,导致古滑坡失稳破坏,主要变形为后缘出现破裂,前缘堵塞长江。

(3) 在古滑坡失稳后,长江也会持续冲刷古滑坡前缘,直至古滑坡前缘坡体冲蚀殆尽,一方面,前缘抗滑能力减弱;另一方面,原始潜在滑面抗剪参数也逐步减弱。但是,滑坡整体仍处于基本稳定状态。

(4) 当三峡工程修建后,滑坡前缘水位上升,致使冲刷影响加剧,且水位周期性升降,进而周期性改变滑坡前缘应力状态,最终造成古滑坡稳定性的疲劳破坏,致使其复活。

据上,滑坡演化过程主要包括古滑坡前期形成及临近复活期,过程阶段较为明显。

3 滑坡稳定性分析

3.1 滑坡稳定性评价模型

3.1.1 Chebyshev - CEEMD - WT 模型的构建

滑坡变形数据的去噪模型为 Chebyshev - CEEMD - WT 模型,去噪处理流程设计如图 2 所示,机理为:

①利用 Chebyshev 滤波将滑坡变形监测数据先分离为消除偏差后的数据和偏差数据。

②通过 CEEMDAN 模型将消除偏差后的数据进一步分解为若干 IMF 分量和残余分量 R_n 。

③再进一步利用 WT 模型对各 IMF 分量进行噪声检验, 进一步剔除其随机噪声, 并将处理后的真实信号进行重构, 即可得到滑坡真实变形信号, 将其作为后续稳定性分析的基础数据。

为合理评价 Chebyshev - CEEMD - WT 模型或其他去噪模型的去噪效果, 提出将信噪比 SNR 和均方根误差 RMSE 作为评价指标:

$$SNR = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_s}{p_n} \right) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f'_i)^2} \quad (2)$$

式中: p_s 为含随机噪声变形序列的功率; p_n 为不含随机噪声变形序列的功率; n 为变形序列的长度; f_i 为含随机噪声变形序列的信号; f'_i 为不含随机噪声变形序列的信号。

信噪比和均方根误差的去噪效果评价标准为: 信噪比值越大, 去噪效果越好; 均方根误差值越小, 去噪效果越好。

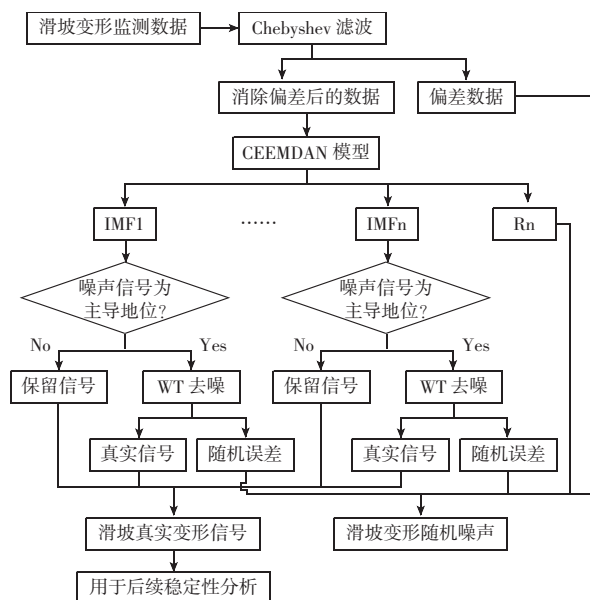


图2 去噪处理流程
Fig. 2 Noise removal process

3.1.2 尖点突变分析模型的构建

尖点突变分析的评价参数为突变特征值 Δ , 其计算公式为:

$$\Delta = 8q^3 + 27p^2 \quad (3)$$

突变特征值 Δ 可作为滑坡现状稳定性的评价指

标, 判断标准为: 若 $\Delta > 0$, 滑坡现状属于稳定状态; 若 $\Delta = 0$, 滑坡现状稳定性具波动性, 即属临界稳定状态; 若 $\Delta < 0$, 滑坡现状属于不稳定状态。

同时, 由于 $\Delta = 0$ 时属临界状态, 那么当 $\Delta > 0$ 时, 其值越小 0, 稳定性相对越差。

3.1.3 MF - DFA 模型的构建

多重分形去趋势波动分析法的波动函数 $F(q, s)$ 计算公式为:

$$F(q, s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(s, v)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (4)$$

式中: N_s 为子序列个数; q 为波动阶次; s 为子序列长度。

$F(q, s)$ 值与 q 值、 s 值相关, 即在 q 值条件下, 改变 s 值可求得对应的 $F(q, s)$ 值, 且 s 值与 $F(q, s)$ 值间存在如下关系:

$$\ln F(q, s) = k + h(q) \cdot \ln s \quad (5)$$

式中: $h(q)$ 为广义 Hurst 指数, 与 q 值对应; k 为拟合常数。

一般来说, $h(q)$ 值不随 q 值变化而变化, 那么滑坡真实变形信号不具多重分形特征; $h(q)$ 值随 q 值增加而减小, 那么滑坡真实变形信号具多重分形特征。

同时, $h(2)$ 值为传统 Hurst 指数, 可利用其开展滑坡真实变形信号的发展趋势评价, 判断标准为: 若 $h(2) < 0.5$, 说明滑坡真实变形信号具减小趋势, 稳定性保持现状或趋于有利方向发展; 若 $h(2) > 0.5$, 说明滑坡真实变形信号具增加趋势, 稳定性趋于不利方向发展; 若 $h(2) = 0.5$, 说明滑坡真实变形信号具随机性, 无法判断变形趋势。

3.2 变形数据特征分析

为充分掌握古滑坡复活变形特征, 在古滑坡主滑面上共布置了 4 个监测点, 其布置位置如图 1 所示。在监测过程中, 监测频率 1 次/月, 共统计 42 期数据 (监测时间为: 2019 年 3 月~2022 年 9 月)。4 个监测点的累计变形曲线如图 3 所示。4 个监测点累计变形的增加趋势显著, 只是不同时段曲线陡缓程度存在一定差异, 其中, ZG1~ZG4 监测点的累计变形分别为 859.72、622.44、591.03、622.39 mm, 均得出该滑坡变形显著。

岩土力学

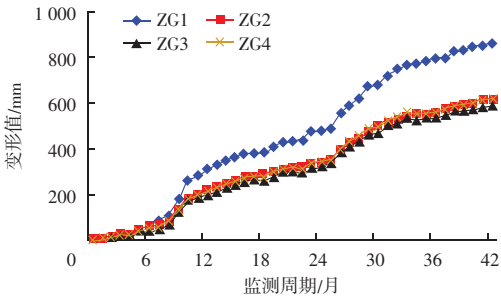


图3 滑坡复活累计变形曲线

Fig.3 Recovery cumulative deformation curve of landslide

3.3 变形数据去噪分析

采用 Chebyshev – CEEMD – WT 模型开展古滑坡变形数据的去噪处理。由于去噪模型是多模型联合去噪方法组合而成，因此，为充分验证各类优化处理方法的合理性，对不同组合过程中的去噪方法均进行去噪效果统计，结果见表 1。

5 种模型 SNR 值具持续增加趋势，RMSE 值具持续减小趋势，不过两者增加或减大幅度存在一定差异。这是由于随着去噪过程的不断优化组合，去噪效果得到了不断提高，且不同优化手段对去噪效果的提高程度是不同的。

表 1 不同去噪组合过程模型的效果统计

Table 1 Effect statistics of different combined denoising process models

模型序号	模型种类	SNR/dB	RMSE/mm
1	EMD	18.35	1.035
2	EEMD	22.49	0.987
3	CEEMD	25.14	0.974
4	Chebyshev – CEEMD	32.58	0.822
5	Chebyshev – CEEMD – WT	38.64	0.564

表 2 滑坡尖点突变分析结果

Table 2 Landslide cusp catastrophe analysis results

监测点编号	拟合结果		突变特征参数			稳定性评价	
	拟合方程	拟合度	q 值	p 值	Δ 值	状态类型	稳定程度排序
ZG1	$y = t^4 - 328t^2 + 122.67t$	0.946	-328	122.67	3.781×10^9	稳定	4
ZG2	$y = t^4 - 305t^2 + 126.55t$	0.951	-305	126.55	4.097×10^9	稳定	3
ZG3	$y = t^4 - 336t^2 + 131.50t$	0.962	-336	131.50	4.365×10^9	稳定	1
ZG4	$y = t^4 - 331t^2 + 130.02t$	0.958	-331	130.02	4.274×10^9	稳定	2

3.5 稳定性发展趋势评价

在古滑坡现状稳定性分析基础上，再进一步利用 MF – DFA 进行稳定性发展趋势评价。各监测点的 MF – DFA 分析结果见表 3。

随着阶数 q 的增加，h (q) 值也随之减小，说明古滑坡真实变形信号具多重分形特征；同时，4 个

为进一步验证 Chebyshev – CEEMD – WT 模型的有效性，提出再以 db 小波、kalman 滤波及 sym 小波进行同样的去噪处理；同时，提出以 SNR 值和 RMSE 值的归一化值相加组成综合评价指标 c，开展不同去噪模型的去噪效果对比。不同去噪模型的结果如图 4 所示。

db 小波、kalman 滤波和 sym 小波对比模型评价指标 c 值的范围为 1.421 ~ 1.506，而 Chebyshev – CEEMD – WT 模型的评价指标 c 值为 1.915，Chebyshev – CEEMD – WT 去噪模型明显优于三类传统去噪模型。

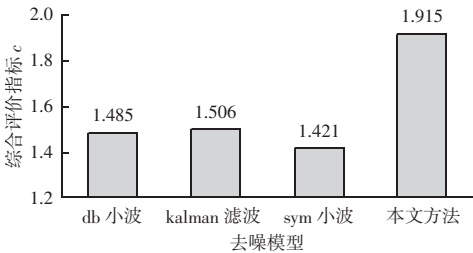


图 4 不同去噪模型的去噪结果

Fig.4 Denoising results of different types of denoising models

3.4 现状稳定性评价

在获得滑坡真实变形信号后，利用尖点突变分析开展古滑坡现状稳定性评价。各监测点的尖点突变分析结果见表 2。4 个监测点的尖点突变分析结果存在一定差异，其中，在拟合度方面，四者的拟合度范围为 0.951 ~ 0.962，均较趋近于 1，说明其分析过程中的拟合效果较优；在分析结果中，Δ 值范围为 $3.781 \times 10^9 \sim 4.365 \times 10^9$ ，均大于 0，说明 4 个监测点现状稳定性均属稳定状态，按稳定程度评价，稳定程度排序为 ZG3 > ZG4 > ZG2 > ZG1。

监测点的 h (2) 值均大于 0.5，说明滑坡真实变形信号具增加趋势，滑坡变形仍会进一步增加，只是趋势程度存在一定差异，判断滑坡稳定性均趋于不利方向发展。按 h (2) 值大小，得各监测点变形增加的趋势性程度排序为：ZG1 > ZG3 > ZG2 > ZG4。

表 3 滑坡变形的 MF-DFA 分析结果

阶数 q	ZG1	ZG2	ZG3	ZG4
-8	0.961	0.933	0.952	0.927
-6	0.924	0.894	0.913	0.880
-4	0.843	0.818	0.837	0.811
-2	0.778	0.736	0.767	0.726
0	0.685	0.666	0.677	0.635
2	0.614	0.586	0.601	0.569
4	0.573	0.552	0.564	0.544
6	0.531	0.512	0.529	0.497
8	0.493	0.488	0.485	0.467

4 结论

通过对顺层深层岩质古滑坡肇灾演化流程分析及稳定性评价，主要得出如下结论：

(1) 古滑坡肇灾影响因素较多，其复活是在内、外两类营力作用下耦合促成，其中，肇灾内部因素是古滑坡复活的固有因素，肇灾外部因素是古滑坡复活的诱发因素。

(2) 在监测时段内，滑坡变形具持续增加趋势，其变形速率虽具波动特征，但波动规律性较强；各监测点现阶段均处于稳定状态，但随着时间持续，其稳定程度逐步减弱，滑坡变形仍会进一步增加，稳定性后续趋于不利方向发展。

参 考 文 献

[1] 张富灵. 库水及降雨作用下位移-弯曲型滑坡形成条件与演化机制研究 [D]. 宜昌：三峡大学，2021.

[2] 田倩，吴健，赵东. 基于神经网络和多标度特征分析的古滑坡变形预测及趋势评价 [J]. 大地测量与地球动力学，2022，42

(10)：1056-1062.

[3] 谭琳，刘芳. 水合物开采中深海古滑坡体的再启滑机制初探 [J]. 工程地质学报，2021，29 (6)：1907-1915.

[4] 卫童瑶，殷跃平，高杨，等. 三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质，2020，47 (4)：73-81.

[5] 何坤，胡卸文，马国涛，等. 四川省盐源玻璃村特大型玄武岩古滑坡复活机制 [J]. 岩土力学，2020，41 (10)：3443-3455.

[6] 黄达，匡希彬，罗世林. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究 [J]. 水文地质工程地质，2019，46 (5)：127-135.

[7] 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.

[8] 宁波，刘玉健，王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析 [J]. 大地测量与地球动力学，2022，42 (5)：515-519.

[9] 赵淑敏. 基于信息分解条件的滑坡变形预测 [J]. 水土保持通报，2021，41 (3)：181-186.

[10] 王晨辉，赵贻玖，郭伟，等. 滑坡位移 EEMD-SVR 预测模型 [J]. 测绘学报，2022，51 (10)：2196-2204.

[11] 付智勇，陈文强，唐伟雄，等. 基于 CEEMD-RF 模型的渣土边坡地下水埋深预测 [J]. 人民长江，2020，51 (1)：141-148.

[12] 熊春宝，王猛，于丽娜. 桥梁 GNSS-RTK 变形监测数据的多滤波联合去噪处理 [J]. 测绘通报，2020 (7)：93-96，142.

[13] 邓小鹏. 基于信息分解的滑坡变形稳定性评价及预警分析 [J]. 人民长江，2021，52 (5)：101-107.

[14] 田成成，张盛生，张磊，等. 基于尖点突变理论及非趋势波动分析的滑坡稳定性及变形特征研究 [J]. 大地测量与地球动力学，2018，38 (8)：806-810.

[15] 常瑶. 基于尖点突变理论和 MF-DFA 法的隧道大变形监测 [J]. 人民长江，2019，50 (1)：118-123.

(上接第 73 页)

[12] 何飞，穆锐，韩力，等. 降雨作用下红黏土边坡的变形及现场剪切试验研究 [J/OL]. 水利水电技术 (中英文)，1-13 [2025-06-25].

[13] 刘志伟，丁波涛，梁崇旭. 含水率对花岗岩边坡风化层界面剪切特性的影响 [J]. 华南地震，2021，41 (4)：115-120.

[14] 杨迪惠，李建华. 降雨入渗条件下非饱和黏土边坡稳定性分析 [J]. 四川地质学报，2017，37 (3)：475-477，481.

[15] 魏锋，赵玉成，王朋. 渗流影响下边坡稳定性与破坏性研究 [J]. 煤炭技术，2017，36 (1)：168-169.