

岩石力学与工程学报

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

ISSN 1000-6915, CN 42-1397/O3

《岩石力学与工程学报》网络首发论文

题目： 滑坡变形的普适性规律及其力学机制
作者： 许强，郭朋瑜
收稿日期： 2026-03-12
网络首发日期： 2026-06-22
引用格式： 许强，郭朋瑜. 滑坡变形的普适性规律及其力学机制[J/OL]. 岩石力学与工程学报. <https://link.cnki.net/urlid/42.1397.O3.20260621.1323.001>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

滑坡变形的普适性规律及其力学机制

许强*, 郭朋瑜

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 成都 610059)

摘要: 滑坡变形演化规律及其力学机制是滑坡监测预警研究的重要科学问题。为揭示其内在演化规律, 本文基于大量滑坡监测数据分析与滑坡变形动力学模型, 系统研究了滑坡在重力作用及外界扰动条件下的变形特征与演化机制。结果表明, 在重力主导条件下, 滑坡位移-时间曲线通常经历初始、稳态和加速三个阶段, 其中加速阶段的速度与加速度满足幂律关系, 反映出重力主导下的共性变形模式, 具有普适性。基于变形特征与受力条件差异, 可将滑坡划分为稳定型、渐变型与突发型三类。在此基础上, 进一步分析了降雨、水位波动及地震等周期性或间歇性外荷载对滑坡变形的影响, 发现其可在三阶段变形框架内产生阶跃式或非平稳变形响应。进一步基于滑坡变形动力学模型, 对重力作用及叠加外界扰动条件下的变形过程进行了理论推导与数值计算, 获得了位移、速度与加速度的演化规律, 并揭示不同类型滑坡形成的力学条件。研究表明, 滑坡变形的阶段性响应源于重力主导下的共性动力学演化过程, 而复杂变形形式可视作该基本模式对不同外界扰动的响应结果。在此基础上, 提出以加速度为主要指标的滑坡预警新思路。研究成果可为滑坡变形机制认识及监测预警提供物理依据。

关键词: 边坡工程; 滑坡; 三阶段变形; 普适性规律; 动力学模型; 外界扰动

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2026)00 - 0000 - 14

***通信作者:** 许强 (1968 -), 现任教授, 主要从事地质灾害防治方面的教学与研究工作。E-mail: xq@cdu.edu.cn

Universal law governing landslide deformation and its mechanical mechanism

XU Qiang*, GUO Pengyu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The evolutionary law and mechanical mechanism of landslide deformation is a fundamental scientific issue in landslide monitoring and early warning research. To reveal its intrinsic evolution characteristics, this study systematically investigates the deformation behavior and evolution mechanisms of landslides under gravity-dominated conditions and external perturbations, based on extensive monitoring data and a landslide deformation dynamic model. The results show that, under gravity-dominated conditions, the displacement-time curve of landslides generally exhibits three stages: initial, steady, and accelerated deformation. In the accelerated stage, a power-law relationship is observed between velocity and acceleration, indicating a typical gravity-driven common deformation behavior, that is, the universal deformation law. Based on differences in deformation characteristics and stress conditions, landslides can be classified into three types: stable, gradual, and abrupt. Furthermore, the effects of periodic or intermittent external loads, such as rainfall, reservoir level fluctuations, and earthquake, are analyzed. The results indicate that these external factors may induce step-like or non-stationary

收稿日期: 2026 - 03 - 12; **修回日期:** 2026 - 04 - 28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003200)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFC3003200)

responses within the three-stage deformation framework. Based on the landslide deformation dynamic model, theoretical derivations and numerical simulations are further conducted for deformation processes under gravity alone and combined external loading conditions. The evolutionary relationships of displacement, velocity, and acceleration are obtained, and the mechanical conditions governing different landslide types are revealed. The results demonstrate that the staged deformation behavior of landslides originates from a gravity-dominated common dynamic evolution process, while complex deformation patterns can be interpreted as responses of this fundamental mechanism under different external perturbations. Based on this, a physically-based early warning indicator is proposed using the minimum acceleration to identify incipient instability during multiple disturbance phases. These findings provide a theoretical foundation for understanding landslide deformation mechanisms and for improving monitoring and early warning systems.

Key words: slope engineering; landslides; three-stage deformation; universal law of deformation; dynamic model; external perturbations

***Corresponding author:** XU Qiang(1968 -), Professor, is engaged in teaching and research of geohazard prevention. E-mail: xq@cdut.edu.cn

1 引言

滑坡是地球表层物质运动中最具破坏性的地质灾害之一,其发生与演化规律长期受到地质学、岩土力学与灾害科学等多学科关注。本质上讲,滑坡是斜坡岩土体在长期重力作用(叠加外界扰动影响)下从变形到破坏的地质过程。变形最易通过肉眼和仪器得到观测,因此成为掌握滑坡发展演化规律,认知和监测预警滑坡的关键指标。但是,滑坡究竟有无统一和普适的变形破坏规律,是国内外学者一直在探究的问题,也是滑坡能否科学监测预警的基础。本文重点探讨滑坡的变形特征和规律。

滑坡变形源自于斜坡岩土体的蠕变^[1-2],因此,滑坡的变形问题归根结底是岩土材料的蠕变问题。固体材料的蠕变行为研究最早可追溯至英国学者 E. N. D. C. Andrade^[3]的工作,他通过金属拉伸试验发现,常温条件下材料变形可分为初始变形、稳态变形和加速变形三个阶段;而在高温条件下变形持续时间显著缩短。1940 年美国学者 D. Griggs^[4]在蠕变试验中观察到灰岩呈现出与金属材料^[5]相似的三阶段蠕变行为。随后,美国学者 A. Casacrande 和 S. D. Wilson^[6]在原状粘土蠕变试验中发现类似现象。除上述金属、岩石与土质材料外,陶瓷、混凝土、聚合物、冰等材料也满足三阶段蠕变规律^[7-10]。三阶段蠕变现象广泛存在于自然与工程材料中,表明其不仅能够合理解释固体材料的蠕变机制及其导致的变形破坏过程,而且为滑坡、地震与火山喷发等自然灾害的预测预报提供了重要手段。

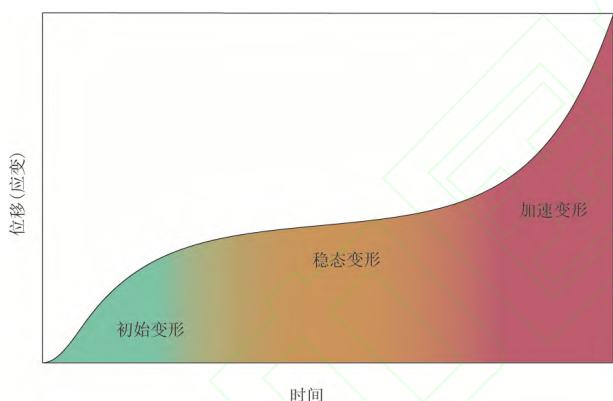
20 世纪 60 年代,日本学者 M. Saito 和 H. Uezawa^[11]将土体的蠕变试验结果推广应用到滑坡研究中,认为重力作用下滑坡位移-时间曲线具有三阶段特征。但滑坡在自然条件下往往被季节性降水、库水位波动与地震等外界扰动影响,其位移-时间曲线会表现为复杂形态。以速率水平为特征可将受降雨影响的滑坡变形状态划分为非常慢、低速、中速、周期性快速 4 种类型^[12]。亦或是通过总结归纳,将滑坡变形分为长期蠕变、震荡变形、收敛变形、指数变形、阶跃变形等五种类型^[13-14]。进一步的研究表明,无论是加速还是减速变形均可基本满足幂函数关系,仅幂的符号和大小不同而已,从而将上述各种类型统一到一种描述体系中,且可通过幂函数的幂值大小来评价滑坡的危险状态^[15-17]。但是这种依靠数学拟合方法并不能统一描述滑坡由慢到快的全过程变形规律。滑坡在外界扰动作用下复杂的位移-时间曲线与仅在重力作用下的三阶段位移-时间曲线之间是否存在关联,目前没有清晰的解释。

近期已有研究建立了描述滑坡重力作用下演化过程的变形动力学模型,为三阶段变形提供了明确的物理机制解释^[18]。然而,不同复杂变形形态的滑坡是否存在统一的演化规律,以及不同类型滑坡变形曲线之间的内在联系,仍是滑坡科学领域亟待解决的重要科学问题。为进一步认识滑坡变形演化的基本规律及其力学机制,本文在系统总结前人研究成果的基础上,结合大量滑坡监测资料,对滑坡变形特征进行了归纳分析,并基于滑坡变形动力学模型对其演化过程进行了理论分析与数值模拟。重

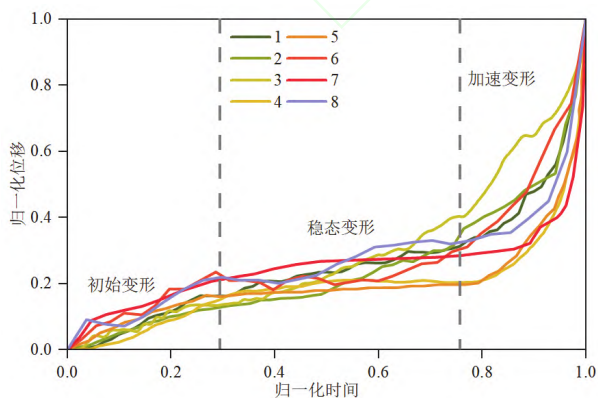
点探讨：(1) 仅受重力作用下滑坡变形的动力学演化框架；(2) 不同受力条件下滑坡位移-时间曲线的基本类型及形成机制；(3) 外界扰动作用下滑坡变形响应特征及其动力学解释。研究结果旨在从统一力学框架下解释滑坡多样化的变形特征，为滑坡监测预警与动力学研究提供新的认识。

2 重力作用下滑坡位移 - 时间曲线特征

滑坡从开始出现变形到最终失稳破坏会依次经历如图 1(a)所示的初始变形(第一阶段)、稳态变形(第二阶段)和加速变形(第三阶段)三个典型阶段。国内外具有相对较全变形过程监测数据的滑坡案例(见表 1)表明，在以重力作用为主(受外界因素影响相对较小)的滑坡，其位移-时间曲线基本都符合三阶段变形特征(见图 1(b))。表 1 收集到的案例以岩质滑坡为主，但砂土、粘性土滑坡同样表现出三阶段变形特征^[19-20]。



(a) 理想化的三阶段位移-时间曲线
(a) Idealized three-stage displacement-time curve



(b) 滑坡监测实例归一化位移-时间曲线
(b) Normalized displacement-time curve of landslide monitoring example

图 1 滑坡三阶段位移 - 时间曲线

Fig.1 The three-stage deformation curve of landslides

初始变形阶段以变形速率逐渐减缓为主要特征，反映滑坡启动后，受本身摩擦阻力的影响变形逐渐减缓。稳态变形阶段的变形速率一般认为其基本保持恒定(中文文献中常称为等速或匀速变形阶段)，被视为材料缓慢塑性流动的体现，也是滑坡处于相对低风险状态的重要指征^[21]。加速变形阶段的位移、速度与加速度均表现出明显的非线性增加，常被视为滑坡发生的前兆^[22]。基于滑坡三阶段变形曲线，各国学者先后提出了多种滑坡发生时间预测预报模型和方法^[23-26]。

加速变形是滑坡发生前的典型特征和关键阶段，也是滑坡预测预报的重要时间窗口。据此，M. Saito^[20]根据滑坡加速变形阶段的位移-时间曲线建立了著名的 Satio 滑坡时间预报模型，即：在位移-时间曲线的加速变形阶段依次选取相等位移间隔的三个时间点 t_1 、 t_2 、 t_3 ，以 t_3 为起点滑坡的剩余寿命 $t_f - t = 0.5(t_2 - t_1)^2 / [(t_2 - t_1) - 0.5(t_3 - t_1)]$ 。该模型开启了滑坡时间定量预报的先河，显示了三阶段变形特征对滑坡预测预报研究的重要作用。

T. Fukuzono^[27]进一步通过模型试验发现，滑坡加速变形阶段(第三阶段)的加速度与速度之间存在幂律关系(即 $d^2\delta / dt^2 = A(d\delta / dt)^\alpha$ ， δ 为位移， A 与 α 为经验常数)，并据此提出了著名的滑坡时间预报速度倒数法，即滑坡变形速度的倒数随时间推移逐渐减小，速度倒数-时间曲线与时间坐标轴的交点即为预报的滑坡发生时刻。速度倒数法已成为国际上最为广泛应用的滑坡发生时间预报方法，在众多滑坡中表现出良好的适宜性^[28]，说明在滑坡加速变形阶段其速度与加速度的幂律关系具有普适性。众多的滑坡监测预报案例表明，幂律关系中的常数 α 多接近 2^[29-32]，但也有较大的变化区间，尤其是到临滑阶段往往会发生较大的变化^[33-34]。B. Voight^[22]将幂律关系进一步扩展至多种自然与工程材料，认为其反映了在恒定温度和压力条件下，由具有速率效应的固体材料损伤所控制的普适性物理规律，并被应用于地震、火山等自然灾害的预测预报^[35-36]。

由此可见，滑坡尤其是以重力作为主要驱动力的滑坡，其位移-时间曲线具有三阶段变形的共性变形模式和规律，且在加速变形阶段其速度与加速度间满足幂律关系。换句话说，不管何种类型的滑坡，归根结底都是岩土材料的蠕变所致以及沿滑动面的剪切滑动行为，其变形具有重力主导下的共性变形模式，从而为滑坡预测预报提供了理论依据。

表 1 一些具有全过程监测数据的典型滑坡基本情况
Table 1 Some basic information on typical landslides with full-process monitoring data

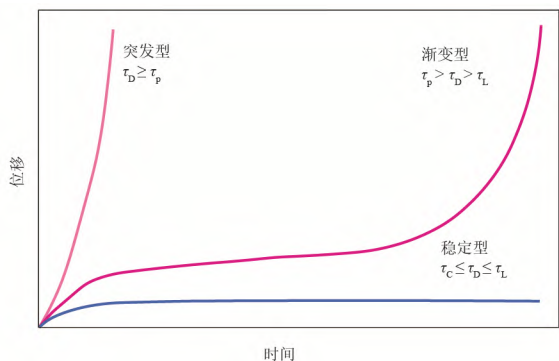
编号 (No.)	滑坡名称 (Landslides name)	位置 (Location)	日期 (Date)	滑体材料 (Landslides materials)	体积(Volume)/m ³	监测设备/方法 (Monitoring equipment/methods)	监测时长 (Monitoring duration)/day
1	New Tredegar ^[37]	英国	1930/4/12	岩石	7.0×10 ⁴	未知	70
2	新卧龙寺 ^[38]	陕西宝鸡	1971/5/5	土	2.0×10 ⁷	裂缝计	51
3	Kagemori ^[39]	日本	1973/9/20	岩石	3.5×10 ⁵	卷尺	442
4	Nevis-Bluff ^[40]	新西兰	1975/6/14	岩石	3.2×10 ⁴	测量标记	283
5	鸡鸣寺 ^[24]	湖北秭归	1991/6/29	岩石	6.0×10 ⁵	裂缝测量	432
6	Cadia ^[41]	澳大利亚	2018/3/9	土	7.2×10 ⁴	SqueeSAR	437
7	Gallivaggio ^[42]	意大利	2018/5/29	岩石	5.0×10 ³	GB-InSAR	148
8	雷打石 ^[43]	四川成都	2019/8/6	岩石	2.2×10 ⁶	SBAS-InSAR	332
9	Vajont ^[44]	意大利	1963/10/9	岩石	2.7×10 ⁸	大地测量	1170
10	Libby ^[45]	美国	1971/1/31	岩石	3.3×10 ³	裂缝计	1343
11	Northern Bohemia ^[46]	捷克	1984/1/7	岩石	1.4×10 ³	裂缝计	159
12	新滩 ^[47]	湖北秭归	1985/6/12	土	3.0×10 ⁷	大地测量	2689
13	大冶铁矿 ^[48]	湖北黄石	1996/7/1	岩石	2.5×10 ⁵	棱镜	1267
14	Letlhakane diamond mine ^[49]	博茨瓦纳	2005/7/14	岩石	2.3×10 ⁵	全站仪	126
15	CEPN ^[50]	澳大利亚	2010/2/2	岩石	未知	全站仪	849
16	金龙沟 ^[51]	二滩水电站	2010/10/23	岩石	2.0×10 ⁵	裂缝计	103
17	Preonzo ^[39]	瑞士	2012/5/15	岩石	1.75×10 ⁵	裂缝计	666
18	La Saxe ^[52]	意大利	2013/4/21	岩石	7.5×10 ²	全站仪	935
19	Puigcercós ^[53]	西班牙	2013/12/3	岩石	1.0×10 ³	LiDAR	2188
20	Galterengraben ^[39]	瑞士	2016/4/24	岩石	2.5×10 ³	裂缝计	365
21	Open pit mine 2# ^[32]	未知	2014/3/7	岩石	1.46×10 ³	GB-InSAR	1.64
22	Open pit mine 4# ^[32]	未知	2016/12/21	岩石	1.1×10 ³	GB-InSAR	2.13
23	Open pit mine 5# ^[32]	未知	2017/2/5	岩石	4.0×10 ³	GB-InSAR	12
24	新磨 ^[54]	四川茂县	2017/6/24	岩石	4.46×10 ⁶	PS-InSAR	985
25	Veslemannen ^[39]	挪威	2019/9/5	岩石	5.4×10 ⁴	GB-InSAR	1795
26	Grabenguffer ^[39]	瑞士	2020/5/17	岩石&冰	5.0×10 ²	GNSS	3153

3 复杂条件下滑坡的位移 - 时间曲线特征

若将滑坡体简化为一个滑动块体,则影响和控制滑坡是否发生的作用力主要有 2 种,即下滑力和抗滑力。下滑力主要包括滑体重力及其它外界作用力(水、地震、人类工程活动等)在滑动方向上的分量,抗滑力为滑带的摩擦阻力。不同滑坡或在滑坡的不同变形阶段,其下滑力和抗滑力之间的力量对比是不相同的,由此导致不同的变形行为和不同的变形形式。

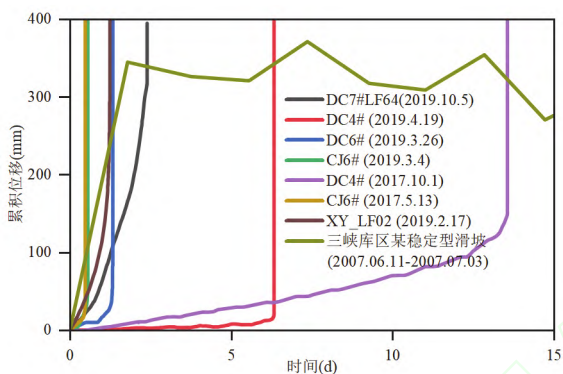
许强等^[55-57]通过对岩土体蠕变试验和典型滑坡监测数据的分析总结发现,滑坡的位移 - 时间曲线总体上可概括为稳定型、渐变型、突发型三类(见图 2(a)),并推测了形成三类变形的力学条

件,即当滑动应力 τ_D 大于滑带岩土体的流变下限 τ_c 而小于某一临界值 τ_L (接近于长期强度)时,斜坡便会因蠕变而产生变形,但因驱动力较小变形将逐渐趋于稳定,形成“稳定型”滑坡。当滑动应力 τ_D 大于临界值 τ_L 而小于滑带的峰值抗剪强度 τ_p 时,将形成具有三阶段变形特征的“渐变型”滑坡;当滑动应力 τ_D 达到或超过滑带峰值抗剪强度 τ_p 时,将形成“突发型”滑坡。“突发型”滑坡从启动变形到最终失稳破坏的时间往往很短,基本不经历稳态变形阶段而直接进入加速变形阶段。相关认识被近年来越来越多的滑坡变形监测结果所证实(见图 2(b))。由此可见,随着下滑力与抗滑力间的差异增大,滑坡的位移 - 时间曲线将由稳定型向渐变型再向突发型转化,形成一个变形曲线簇,其中具有典型三阶段特征的位移 - 时间曲线仅为最常见的曲线类型——渐变型。



(a) 滑坡位移—时间曲线的三种类型及其形成的力学条件

(a) Three types of displacement-time curves of landslides and the mechanical conditions for their formation



(b) 近年来发生的一些典型滑坡的位移—时间曲线^[55, 58]

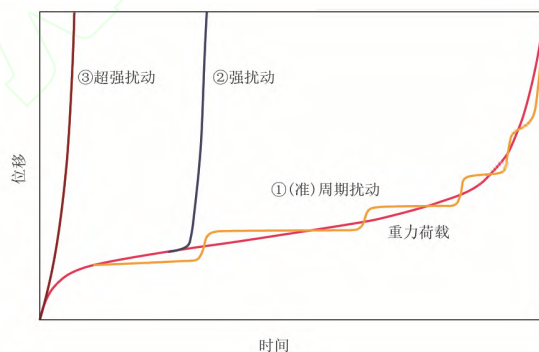
(b) The displacement-time curves of some typical landslides that occurred in recent years

图 2 滑坡变形类型与监测数据

Fig.2 The deformation types and monitoring data of landslides

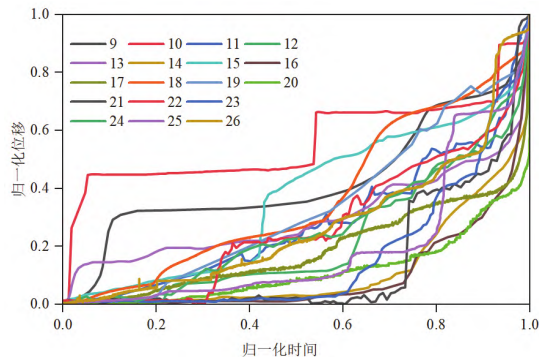
前述岩土体蠕变试验一般是在常温恒压条件下开展的，所列举滑坡案例也主要为受外界因素影响较小的重力型滑坡。但自然界的滑坡处于开放系统中，在其形成和发展演化过程中或多或少会遭受外界因素(如降雨、人类工程活动等)的影响和扰动，其位移—时间曲线并不都如图 1(a)所示理想，这一点在图 1(b)的实际滑坡位移—时间曲线中已得到体现。在受外界因素影响较小的理想状态下滑坡位移—时间曲线呈现出相对平滑的特点。当滑坡在其形成和发展演化过程中，受到降雨、地下(表)水位变动、人类工程活动等扰动时，外荷载的影响将在位移—时间曲线得到明显体现，使其出现上下波动(见图 1(b))。当滑坡变形过程遭受周期性外荷载作用，如水库岸边的滑坡受每年周期性水位变动影响会呈现出“阶跃型”位移—时间曲线，每年位移呈阶梯型增加，但其总体变形趋势仍符合三阶段变形规律(见图 3(a))。每年汛期的季节性强降雨也可使正在变形的滑坡呈现出阶跃型变形曲线。

图 3(b)为一些阶跃型位移—时间曲线的案例。为掌握阶跃型滑坡的总体变形趋势，可采用平滑滤波等数据处理方法用平滑曲线去拟合阶跃型位移—时间曲线(见图 3(a)①)。在滑坡变形演化过程中，若遭受强度较大的突发性外界扰动(如强降雨、强震、剧烈的人类工程活动等)，可使滑坡迅疾进入加速变形阶段，并很快发生滑坡(见图 3(a)②)。更有甚者，斜坡尚未开始变形就遭受超强的外界扰动(如强震)，将可能导致滑坡突然启动，并很快发生滑坡(见图 3(a)③)。图 3(a)将遭受不同强度和形式外荷载作用的滑坡位移—时间曲线统一到一张图中，表明即使在各种复杂的外动力作用下，滑坡仍具有重力主导下的共性变形模式。Q. H. Lei 和 D. Sornette^[59]在滑坡幂率关系模型中通过引入对数周期振荡项，建立了一个能分析复杂变形过程的滑坡发展演化趋势的统一模型(Unified failure model)。通过该模型，利用滑坡地表位移、地震能量释放、冰川位移等监测数据，对全球 109 个地质灾害事件的复杂破裂行为进行描述，取得了良好的效果。这也间接说明，滑坡即使遭受不同外界因素的影响，其变形仍然具有规律性。



(a) 复杂条件下滑坡变形示意图

(a) Schematic diagram of landslide deformation under complex conditions



(b) 复杂条件下阶跃型滑坡归一化位移—时间曲线

(b) Normalized displacement-time curve of step-type landslide under complex conditions

图 3 复杂条件下滑坡变形类型与监测数据

Fig.3 The deformation types and monitoring data of landslides under complex conditions

4 描述滑坡变形的理论模型

4.1 滑坡受力机制

滑坡的变形行为主要由下滑力与抗滑力之间的相互作用所控制^[60]。重力是驱使滑坡变形的基本下滑力^[55]，此外，各种外动力作用使下滑力发生变化。例如：地震作用产生的瞬时动力^[61]；库水位下降引起的渗流压力^[62]；降雨入渗引起的滑坡内部孔隙水压力^[63]或陡倾张裂中水的平推力^[64]；人工堆载^[65]与崩滑堆积物加载^[66]导致斜坡重力荷载增加；人工开挖^[67]、河流侵蚀^[68]与冰川消退^[69]增大剪切带所受下滑力。上述因素的作用会增大滑坡下滑力，从而驱使滑坡变形。另一方面，降水、灌溉或库水入渗引起基底水压力增加^[70-71]或岩土体软化^[72]等将导致抗滑力降低。但植物根系通过吸收土层中的水分与加筋作用可增强抗滑力^[55]。

图 4(a)描述了滑坡可能存在的受力状况。滑体的下滑力(F_D)，主要包括重力沿滑动方向分量($F_{gravity}$)及其在外部因素(地震动力, $F_{seismicity}$ ；渗流力, $F_{seepage}$ ；水平间隙水压力, $F_{hydro-pressure}$)。滑床与滑体之间的抗滑力(F_R)起到抑制滑动的作用；在地下水作用显著的情形下，还需考虑滑床处的孔隙水压力(p)的影响。滑坡的下滑力与抗滑力间的差异决定滑坡的变形趋势，而外界因素则通过改变这一力学平衡影响滑坡的演化进程。

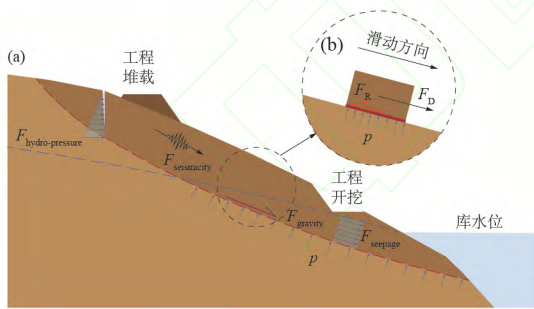


图 4 滑坡变形过程中的受力示意图

Fig.4 Schematic diagram of forces in landslide deformation

4.2 滑坡变形动力学模型

通过下滑力和抗滑力建立的极限平衡方程为静力学方程，仅能通过两者的相对大小计算滑坡的稳定性，判断滑坡是否稳定，而难以描述滑坡从启动到缓慢变形再到加速变形直至滑坡发生的动力学过程。为了从理论上描述滑坡的变形演化动力学过程，许强和郭朋瑜^[18]构建了滑坡动力学模型，其主要思想是通过引入与加速度有关的惯性力项，将

传统静力学模型扩展为动力学模型。传统极限平衡静力学模型仅考虑了滑坡下滑力(F_D)和抗滑力(F_R)两种力学作用，根据达朗贝尔原理，增加了惯性力(F_I)，以加速度来反映滑坡的变形行为。滑体在变形过程的任意时刻，作用于滑体的下滑力、抗滑力和惯性力三者维持平衡，即

$$F_D + F_R + F_I = 0 \quad (1)$$

根据牛顿第二定律，式中 $F_I = -m(d^2\delta / dt^2)$ ， m 为滑体质量， δ 为位移。下滑力(F_D)取决于滑坡的物质组成、体积与外动力条件，主要为重力及其外动力作用在滑动方向上的下滑分力。抗滑力(F_R)为滑带摩擦阻力，由滑带的力学强度决定，水和一些物理化学学会对抗滑力产生影响。大量的试验表明，因岩土材料普遍存在应变软化现象，抗滑力可由滑移强化—弱化摩擦律来定量描述。滑坡动力学方程可变为有效应力形式，具体如下：

$$\tau_D - \mu_s(\sigma_n - p) - \rho h(d^2\delta / dt^2) = 0 \quad (2)$$

$$\mu_s = \begin{cases} g_1\delta & \delta \leq \delta_p \\ \mu_r + g_2(\delta - \delta_p) & \delta_p < \delta \leq \delta_r \\ \mu_r & \delta > \delta_r \end{cases} \quad (3)$$

式中： τ_D 为滑动应力， μ_s 为摩擦系数，采用线性简化模型^[73]； g_1 、 g_2 为斜率， $g_1 = \mu_p / \delta_p$ ， $g_2 = (\mu_p - \mu_r) / \delta_p - \delta_r$ 。 δ_p 、 δ_r 分别为峰值摩擦系数 μ_p 与残余摩擦系数 μ_r 对应的位移值。 σ_n 为法向应力(Pa)， p 为基底水压力(Pa)， ρ 为滑体密度(kg/m^3)， h 为滑体厚度(m)， t 为时间(s)。变形动力学模型对滑带应变软化行为采用线性化简表达，其主要目的是在保证物理机制清晰的前提下，获得可解析的解形式。解析结果表明，滑体的惯性力与滑带的应变软化共同控制三阶段变形行为^[18]。尽管非线性摩擦及速率效应会对变形过程的具体数值结果产生一定影响，但变形演化趋势总体一致，三阶段变形模式仍然能够得到有效识别。

需要指出的是，式(1)基于达朗贝尔原理建立，为滑体整体(质心)尺度的动力学平衡方程，其本质为矢量形式。该形式能够较好地描述平面型滑坡的整体动力学行为。然而，对于曲面型滑坡，滑带不同位置处的切向方向与滑体质心加速度方向并不一致，严格而言应采用连续体形式对滑体动力学进行描述。为了建立可解析的动力学模型，本文采用单自由度等效方法，将滑体视为沿主滑动方向运动的整体刚体，并将动力学方程沿主滑动方向进行投影，从而实现由矢量形式向标量形式的转化。在此过程

中,滑带上的抗滑力并非来源于某一点的局部应力,而是滑带剪切应力在整个滑动面上的积分结果的等效合力。在此基础上,引入有效应力原理,从而得到滑坡动力学方程的等效标量形式。需要强调的是,上述处理本质上是一种平均化与等效化近似,可视为连续体动力学方程在主滑动方向上的降阶表达。在滑体整体滑动方向较为一致、变形以整体滑移为主的条件下,该近似是合理的,并已在滑坡变形及块体模型研究中得到广泛应用^[74-78]。

利用上述模型可解析求解滑坡位移、速度、加速度、应力、能量及稳定性随时间变化规律,揭示滑坡变形的内在机制,即惯性力、下滑力与抗滑力之间的协同作用^[18]。图 5 展示了三者的关系:下滑力为滑体提供持续驱动力,抗滑力起阻抗作用,惯性力由两者差值产生并体现系统的变形响应。位移变化会改变下滑力与抗滑力的相对平衡,形成正负反馈机制,继而影响惯性力与加速度。在负反馈机制中,位移增加可增强抗滑力,从而抑制加速度和惯性力,系统趋于稳定;在正反馈机制中,位移增加削弱抗滑力或增强下滑力,使加速度和惯性力增大,进一步促进位移增长,形成加速失稳过程。两种反馈机制体现了 3 种力在不同阶段的协同方式,并共同控制滑坡从稳定变形到加速失稳的演化过程。

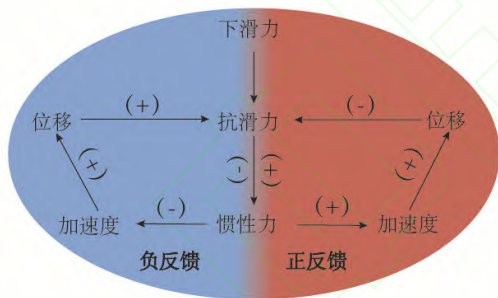


图 5 滑坡变形过程中的反馈机制

Fig.5 Feedback mechanisms during landslide deformation

需要指出的是,在滑坡缓慢蠕变阶段,其加速度通常较小,惯性力在量级上远小于下滑力与抗滑力,动力学方程可近似退化为准静态平衡状态。然而,引入惯性项的目的并非强调其在该阶段的数值贡献,而是为了建立统一的滑坡变形动力学描述框架。从物理意义上看,惯性力反映了滑体对受力变化的响应能力,使模型能够刻画滑坡从初始变形或减速、稳态蠕变到加速失稳的全过程演化。因此,该动力学模型并不意味着惯性力在蠕变阶段占主导作用,而是在完整动力学框架下,通过惯性项的引

入实现对滑坡演化不同阶段的统一描述。随着滑体进入加速变形阶段,加速度迅速增大,惯性项的作用逐渐增强,并成为控制系统动力学响应的重要因素,从而能够合理表征滑坡由稳定向失稳转化的过程。

4.3 渐变型与突发型滑坡形成的力学条件

若滑坡在外界因素(如降雨)诱发下开始出现变形,其变形将向何种方向发展,是逐渐趋于稳定不发生滑坡,还是经历一段时间缓慢变形后加速变形并最终失稳破坏,以及短期内发生突发性破坏?这种变形趋势性预测对科学指导防灾减灾工作十分重要。

根据前述滑坡变形动力学模型,可从理论上推导出滑坡变形是向渐变型还是突发型发展的力学条件。模型指出,滑坡位移-时间曲线的形态受滑动应力大小的影响。在较小的滑动应力驱动下,滑坡表现出三阶段变形规律,其显著特征为在滑带的强化阶段出现相应的速度峰值。滑坡在强化阶段($\delta < \delta_p$)的位移-时间函数为

$$d\delta / dt = (\tau_D / \sqrt{\tau_p \rho h / \delta_p}) \sin[t\sqrt{\tau_p / (\delta_p \rho h)}] \quad (4)$$

$$\tau_p = \mu_p (\sigma_n - p)$$

式中: τ_p 为滑带的峰值抗剪强度,强化阶段($\delta < \delta_p$)的加速度-时间函数为

$$d^2\delta / dt^2 = (\tau_D / \rho h) \cos[t\sqrt{\tau_p / (\delta_p \rho h)}] \quad (5)$$

加速度在强化阶段单调减小^[18],根据导数的性质,若要速度出现峰值即式(4)在 $[0, \delta_p]$ 内存在极大值,那么式(5)的最小值需小于0。加速度在给定区间的最小值为

$$d^2\delta / dt^2 |_{t=t_p} = (\tau_D / \rho h) \cos[t_p \sqrt{\tau_p / (\delta_p \rho h)}] \quad (6)$$

式中: t_p 为位移为 δ_p 对应的时刻

$$t_p = \sqrt{(\rho h \delta_p) / \tau_p} \arccos(1 - \tau_p / \tau_D) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得到

$$d^2\delta / dt^2 |_{t=t_p} = (\tau_D / \rho h) (1 - \tau_p / \tau_D) \quad (8)$$

由于 τ_D 、 ρ 、 h 、 τ_p 等参数均大于0,则有 $\tau_D < \tau_p$ 时加速度最小值小于0,速度存在峰值,位移-时间曲线呈三阶段的渐变型滑坡;反之则大于或等于0,速度无峰值,位移曲线为单调加速的突发型滑坡。

选取任一滑坡滑带直剪试验参数(见表 2),根据滑坡动力学模型绘制不同受力条件下滑坡位移-时间曲线(见图 6)。如图 6(a)所示,滑坡的位移-时间曲线形态与发展趋势受应力条件控制。理论推导结

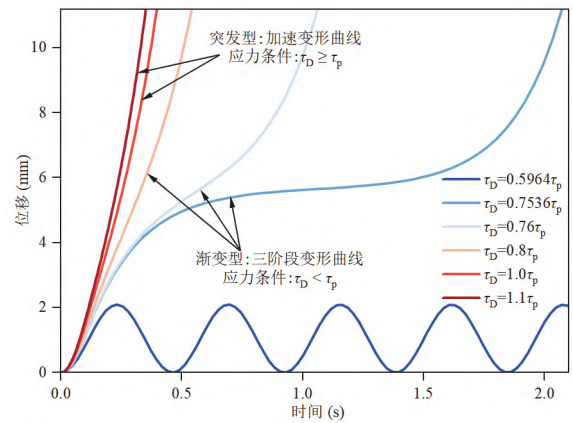
果基本与图 2(a)所示的原推测结果一致, 即当滑动应力 τ_D 小于滑带峰值抗剪强度 τ_p 时, 滑坡位移 - 时间曲线表现为渐变型, 具有三阶段变形特征。随着滑动应力的增大, 滑坡由初始变形过渡至滑坡发生所经历的时间不断缩短。当滑动应力大于或等于滑带的峰值抗剪强度时 ($\tau_D \geq \tau_p$), 滑坡会不经历稳态变形阶段直接加速直至破坏, 转变为突发型滑坡。当然, 渐变型滑坡的滑动应力还应大于某一临界应力 ($\tau_D > \tau_L$), 这是其发生失稳的内在条件(临界应力 τ_L 的有关详情参见许强和郭朋瑜^[18])。若滑动应力小于该临界应力, 斜坡变形将逐渐趋于稳定而不会发展成滑坡。动力学框架下, 该稳定状态对应于系统的有界响应, 即滑体位移与速度均不会发生持续增长, 表现为非发散演化特征。需要指出的是, 在未引入耗散机制的情况下, 系统响应可能表现为周期性振荡, 该振荡来源于动力学方程中惯性力与抗滑力之间的内在耦合作用, 而非外界扰动所致。尽管存在振荡行为, 其响应幅值保持有限, 系统整体仍处于稳定状态。当然, 即使是“稳定型”滑坡, 若遭遇强烈的外界扰动, 也可能出现加速变形并失稳破坏。

当滑动应力接近峰值强度时, 位移 - 时间曲线变化较快, 难以区分渐变型与突发型滑坡。但根据速度 - 时间曲线簇(见图 6(b)), 突发型滑坡与渐变型滑坡的最大区别是有无速度峰值。渐变型滑坡在初始变形阶段通常表现出明显的速度峰值, 随后速度减小并进入稳态阶段后再加速; 而突发型滑坡则缺乏速度峰值, 其速度呈单调增加趋势。2 类滑坡速度特征的差异, 本质上源于受力条件对加速度的控制作用。突发型滑坡所受滑动应力大于或等于剪切带峰值强度, 导致其加速度在整个过程中始终不会小于 0(见图 6(c)), 这一特征决定了其速度呈单调递增变化。若滑动应力低于剪切带峰值强度, 渐变型滑坡的加速度可转为负值, 使速率经历下降并进入减速阶段, 最终形成速度“先增 - 后减 - 再增”的非线性演化过程。

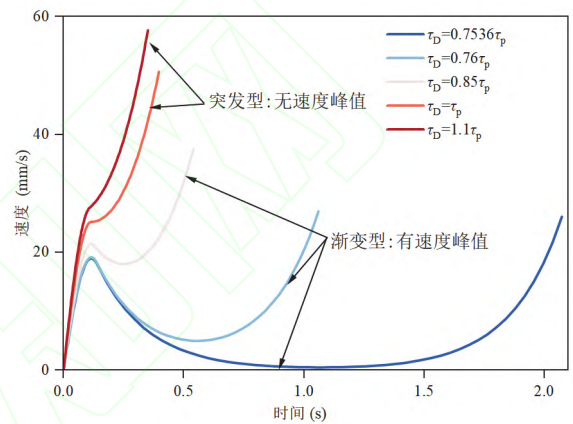
表 2 滑坡变形算例参数表^[79]

Table 2 Table of parameters for landslide deformation example^[79]

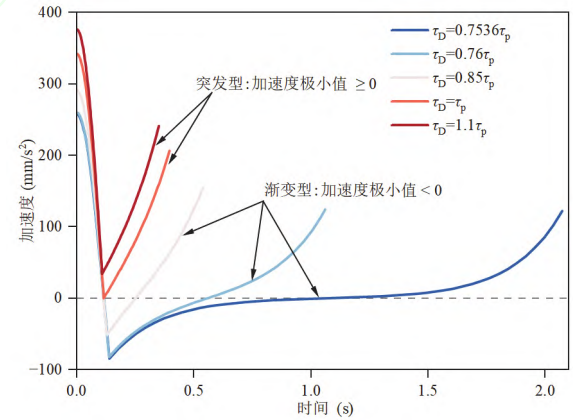
参数 (Parameters)	值 (Value)	参数 (Parameters)	值 (Value)
τ_p	53040(Pa)	g_1	184.9695(m ⁻¹)
μ_p	0.3422	g_2	-22.1554(m ⁻¹)
μ_r	0.1355	σ_n	155000(Pa)
δ_p	0.00185(m)	ρ	2000(kg/m ³)
δ_r	0.01118(m)	h	77.5(m)



(a) 位移 - 时间曲线簇
(a) Displacement-time curve cluster



(b) 速度 - 时间曲线簇
(b) Velocity-time curve cluster



(c) 加速度 - 时间曲线簇
(c) Acceleration-time curve cluster

图 6 不同受力条件下滑坡的理论变形 - 时间曲线簇

Fig.6 Theoretical deformation curves of landslides under different driving stress

4.4 外荷载作用下滑坡位移 - 时间曲线理论分析

前已述及, 除重力作用外, 滑坡在形成与演化过程中常受到诸如降雨、人类工程活动及地震等外界因素扰动。这些因素会改变滑坡的受力条件, 使其变形特征趋于复杂, 位移 - 时间曲线会发生波动,

如图 3 所示。以下利用滑坡变形动力学模型^[18]对外界扰动影响给予理论分析。以表 2 为基本参数，以式(1)为计算模型，改变滑动应力 τ_D 以模拟不同荷载作用变化，得到图 7(a)所示结果。驱动应力 τ_D 的变化如图 7(b)所示，荷载强度比表示 τ_D 与滑带峰值抗剪强度 τ_p 的比值。相关设定旨在对滑坡在不同外界扰动作用下的变形响应做一般性阐释而非复现具体案例。

在滑坡孕育过程中，降雨入参与地下水位变化通过改变滑带孔隙水压力，进而影响滑坡的有效应力状态。根据有效应力原理，孔隙水压力升高会降低有效法向应力，从而削弱抗滑力。本文为简化分析，将降雨、水位变化等水-岩土耦合作用等效为孔隙水压力的变化，即以孔隙水压力导致有效应力的时变项表征外界扰动对变形演化的影响，并实现与地震等动力作用的统一表达。当然，该方法属于简化近似，适用于以滑带剪切控制为主且孔隙水压力分布相对均匀或可等效表征的情形。在强非均匀渗流或多场耦合显著条件下，孔压分布及其与变形的耦合作用更为复杂，需采用完整的水-力耦合模型进一步分析。

图 7(a)为重力型滑坡在遭遇不同类型和强度的外荷载作用下位移-时间曲线的理论分析结果。当无外界扰动时，滑坡在重力作用下呈现出典型的三阶段变形特征，其从变形开始到最终失稳破坏所经历的时间尺度，即重力荷载(τ_G)下寿命 T_0 主要由岩土体力学特性与重力大小共同决定。当在重力基础

上施加周期性水压变化(如 $P = 0.8P_0 \sin(28t) + P_0$)，以模拟季节性降雨或库水位周期性升降等作用时，滑坡位移-时间曲线呈现明显的阶跃型特征，其寿命 T_1 相较于 T_0 有所缩短。当滑坡经历一段时间重力变形后突然受到较强外荷载(例如突发性强降雨或地震， $\tau_D = 3.0\tau_G$)时，滑坡可能迅速进入加速变形阶段，并在较短时间内失稳破坏，其表观寿命 T_2 将明显短于 T_0 。对于尚未发生明显变形的稳定斜坡，若突然受到超强外界扰动(如极端暴雨或强震， $\tau_D = 4.5\tau_G$)，滑坡可迅速启动并在极短时间内变形失稳，其寿命 T_3 最短，甚至可在数分钟至数小时内发生^[58-80]。

由此可见，超强扰动、强扰动以及周期性荷载作用下所形成的不同滑坡变形曲线，本质上是滑坡动力学模型在重力作用基础上叠加不同外荷载作用的结果，其多样化变形特征可视为重力型滑坡三阶段变形曲线对外界扰动的响应。重力作用下的三阶段变形过程不仅是滑坡变形演化的基本形式，也是复杂条件下多样化变形行为的基础。因此，认识滑坡变形行为的关键在于把握重力作用下的三阶段变形规律。三阶段变形不仅构成滑坡演化的统一框架，也反映了固体材料在外荷载作用下的普适性变形响应特征。因此，在各种外动力作用下观测到的阶跃型或波动型位移-时间曲线，本质上仍属于三阶段变形曲线在外界扰动作用下的表现形式，而非新的独立变形类型。

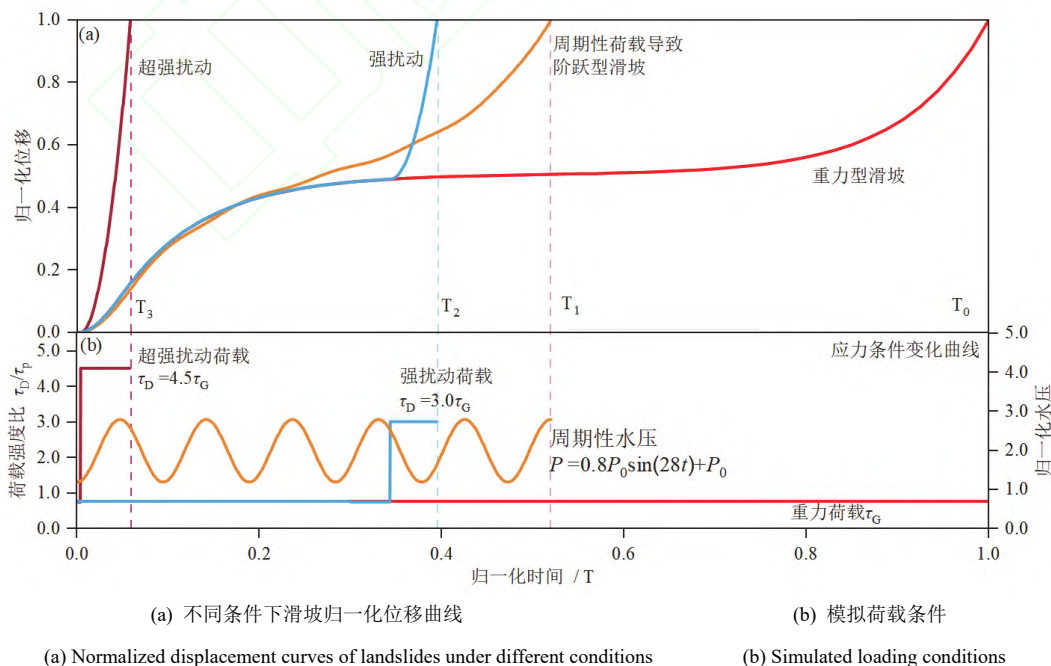


图 7 外界因素影响下滑坡位移-时间曲线的理论分析结果

Fig.7 Theoretical analysis results of the influence of external factors on the displacement-time curve of landslides

进一步地,从滑坡演化的内外驱动机制来看,上述阶跃型或波动型变形可借鉴“内生-外生”框架来理解。已有研究表明^[81],滑坡变形由内生动力(如强度时效演化、损伤累积)与外生扰动(如降雨、水位波动、地震等)共同控制,其中外生因素主要通过改变应力状态作用于内生因素,而内生因素决定系统的演化路径及失稳方式。在本文动力学模型中,(准)周期性外荷载通过改变滑动应力或孔隙水压力体现,其引起的阶跃或波动型位移可视为对外生扰动的直接响应。由于模型未显式考虑时间或路径依赖的强度演化,外荷载主要改变瞬时受力状态,而不改变系统内在结构。在更一般情况下,外生扰动还可能通过影响强度演化与内生机制耦合,从而改变整体变形趋势。因此,本文所讨论的阶跃型变形属于外生驱动主导下的响应形式,更复杂的耦合机制有待进一步研究。

5 基于物理机制的滑坡预警新思路

目前的滑坡预警主要依赖于统计或经验方法,缺乏明确的物理机制。本文研究成果可为基于物理机制的滑坡预警提供新思路 and 指引。

图6表明,通过滑动应力 τ_D 与滑带峰值抗剪强度 τ_p 的比值,以及滑坡初始启动阶段加速度极小值的大小,来分析预判滑坡启动后究竟会不会发生滑坡以及发生突发型还是渐变型滑坡,提供了理论依据,为滑坡的中长期趋势预测提供了新途径。

本文通过引入惯性力将原基于极限平衡的静力学模型转化为可反映滑坡整个变形过程的动力学模型,主要依托牛顿第二定律引入了加速度项。因此,滑坡预警指标除传统主要考虑位移、速度、牛顿力以及降雨等外界诱发因素外,加速度可作为滑坡预警的关键指标。从理论上讲,当滑坡进入稳态变形阶段后,加速度应接近于零或在零上下震荡波动;当进入加速变形阶段后,加速度会持续为正值,尤其到临滑阶段后,加速度会在正值的基础上不断增加,预示着滑坡即将发生(见图8^[82])。加速度的发展演化趋势为滑坡预警提供了新的指引。

对于突发型滑坡,仅依靠宏观变形已很难提前预警,或发出预警信息后避灾时间会很短,防灾效果大打折扣。应结合促使滑坡发生的外界因素(如降雨量、地下水位),从形成条件方面提前预警^[58];或采用比宏观变形更为提前的一些前兆信息(如牛顿力^[83]、微震或声发射信号^[84]等),实施滑坡的综合预警。

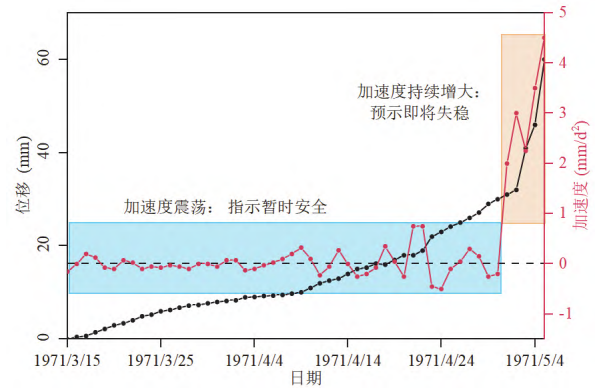


图8 1971年5月5日新卧龙寺滑坡前预警回溯

Fig.8 Backtracking of the XinWolongsi landslide warning before May 5, 1971

6 结论

本文基于滑坡变形动力学模型及监测资料分析,系统研究了重力及外界扰动条件下滑坡变形的共性与差异性特征及其动力学机制,主要结论如下:

(1) 在重力作用(受外界扰动较小),滑坡普遍表现出与固体材料蠕变相似的三阶段变形特征,即包括初始、稳态和加速变形阶段。表明滑坡变形在重力主导条件下具有统一的阶段性演化特征,即其变形过程可由初始、稳态向加速阶段逐步发展,并在加速阶段呈现出明确的动力学响应规律。该共性演化特征反映了滑坡从稳定到失稳这一从质变到量变过程的基本动力学路径,可为滑坡变形阶段识别与失稳判据构建提供理论依据,同时为监测数据解释及预警预测模型构建提供物理基础。

(2) 在重力作用下,由于受力与启动条件的差异,可将滑坡划分为稳定型、渐变型和突发型3类,不同类型对应不同的力学条件及演化路径。其中,稳定型斜坡在变形启动后逐渐趋于稳定;渐变型滑坡完整经历三阶段变形过程;突发型滑坡则可能不经历稳态变形阶段而直接进入加速变形阶段,表现出明显的突发失稳特征。

(3) 重力作用下叠加外界扰动作用的理论分析表明,对于变形受局部化剪切带控制的滑坡类型,重力作用下的三阶段变形可作为其基本动力学演化形式。在此类滑坡中,变形主要集中于滑带,其演化过程可由驱动力与抗滑力之间的相互作用所控制。滑坡变形曲线的多样性主要来源于外界扰动及外界受力条件变化对该基本演化模式的影响。在不同外荷载条件下,滑坡变形过程本质上表现为同一动力学框架下不同受力路径的响应结果,即重力控

制下三阶段演化规律在不同外界扰动条件下的具体体现形式。

(4) 基于滑坡变形动力学模型, 建立了变形与力学状态间的物理联系, 并提出将加速度及其发展演化趋势作为新的滑坡预警指标。当加速度在零轴附近震荡时, 滑坡处于亚稳定状态; 当加速度持续大于零时, 系统进入持续加速阶段, 表明滑坡已处于不稳定状态, 应及时预警。

(5) 本文提出的动力学框架适用于以重力驱动、受局部化剪切带控制的滑坡类型, 可为滑坡变形阶段识别、稳定性分析及监测预警提供理论依据。未来可进一步考虑水-力耦合、非线性及速率相关本构关系等因素, 以拓展模型在复杂工程条件下的适用性。

参考文献(References):

- [1] ASCH Th J W V, GENUCHTEN P M B V. A comparison between theoretical and measured creep profiles of landslides[J]. *Geomorphology*, 1990, 3(1): 45 - 55.
- [2] FURUYA G, SASSA K, HIURA H, et al. Mechanism of creep movement caused by landslide activity and underground erosion in crystalline schist, Shikoku Island, southwestern Japan[J]. *Engineering Geology*, 1999, 53(3-4): 311 - 325.
- [3] ANDRADE E N D C. On the viscous flow in metals, and allied phenomena[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1910, 84(567): 1 - 12.
- [4] GRIGGS D. Experimental flow of rocks under conditions favoring recrystallization[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1940, 51(7): 1 001 - 1 022.
- [5] COTTRELL A H. The time laws of creep[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1952, 1(1): 53 - 63.
- [6] CASACRNDE A, WILSON S D. Effect of rate of loading on the strength of clays and shales at constant water content[J]. *Géotechnique*, 1951, 2(3): 251 - 263.
- [7] GARDNER A R, JONES R H, HARRIS J S. A new creep equation for frozen soils and ice[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1984, 9(3): 271 - 275.
- [8] WANG Yingchong, ZHOU Na, CHANG Fuqing, et al. Brittle creep failure, critical behavior, and time-to-failure prediction of concrete under uniaxial compression[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1 - 8.
- [9] SCHACHNER S, JIN Shengli, GRUBER D, et al. Three stage creep behavior of MgO containing ordinary refractories in tension and compression[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(7): 9 483 - 9 490.
- [10] SHAO Menglong, TAM L, WU Chao. A universal creep model for polymers considering void evolution[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 297: 112280.
- [11] SAITO M, UEZAWA H. Failure of soil due to creep[C]// In: *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Paris, France, 1961: 315 - 318.
- [12] PETLEY D N, MANTOVANI F, BULMER M H, et al. The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns[J]. *Geomorphology*, 2005, 66(1-4): 133 - 147.
- [13] ZHANG Junrong, TANG Huiming, LI Changdong, et al. Deformation stage division and early warning of landslides based on the statistical characteristics of landslide kinematic features[J]. *Landslides*, 2024, 21(4): 717 - 735.
- [14] ZHANG Junrong, TANG Huiming, TAN Qinwen, et al. A generalized early warning criterion for the landslide risk assessment: deformation probability index (DPI)[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19: 2 607 - 2 627.
- [15] CASCINI L, CALVELLO M, GRIMALDI G M. Displacement trends of slow-moving landslides: Classification and forecasting[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(3): 592 - 606.
- [16] CASCINI L, SCOPPETTUOLO M R, BABILIO E. Forecasting the landslide evolution: from theory to practice[J]. *Landslides*, 2022, 19(12): 2 839 - 2 851.
- [17] SCOPPETTUOLO M R, CASCINI L, BABILIO E. Typical displacement behaviours of slope movements[J]. *Landslides*, 2020, 17(5): 1 105 - 1 116.
- [18] 许强, 郭朋瑜. 滑坡变形机理与特征研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55(7): 1 222 - 1 234.(XU Qiang, GUO Pengyu. Mechanism and characteristics of landslide deformation[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2025, 55(7): 1 222 - 1 234.(in Chinese))
- [19] SASAHARA K. A relation for accelerating deformation of sandy soil and its application to predict the time to failure of a sandy model slope under repeated rainfall. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(7): 208.
- [20] SAITO M. Forecasting time of slope failure by tertiary creep[C]// In: *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Vol. 2*. Mexico City, Mexico, 1969: 677 - 683
- [21] ZHOU Shu, OUYANG Chaojun, HUANG Yu. An InSAR and depth-integrated coupled model for potential landslide hazard assessment[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17: 3612 - 3633.

- [22] VOIGHT B. A relation to describe rate-dependent material failure[J]. *Science*, 1989, 243(4888): 200 - 203.
- [23] INTRIERI E, CARLÀ T, GIGLI G. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193: 333 - 349.
- [24] XU Qiang, YUAN Yong, ZENG Yuping, et al. Some new pre-warning criteria for creep slope failure[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(S1): 210 - 220.
- [25] MUFUNDIRWA A, FUJII Y, KODAMA J. A new practical method for prediction of geomechanical failure-time[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(7): 1 079 - 1 090.
- [26] HAO Shengwang, YANG Hang, ELSWORTH D. An accelerating precursor to predict "time-to-failure" in creep and volcanic eruptions[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, 343: 252 - 262.
- [27] FUKUZONO T. A method to predict the time of slope failure caused by rainfall using the inverse number of velocity of surface displacement[J]. *Journal of Japan Landslide Society*, 1985, 22(2): 8 - 13_1.
- [28] SHARIFI S, MACCIOTTA R, HENDRY M T. Critical assessment of landslide failure forecasting methods with case histories: a comparative study of INV, MINV, SLO, and VOA[J]. *Landslides*, 2024, 21(7): 1 629 - 1 643.
- [29] CROSTA G B, AGLIARDI F. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 176 - 191.
- [30] SASAHARA K. Development of the surface displacement during repeated rainfalls in sandy model slopes: condition for the increase of the displacement to failure[J]. *Landslides*, 2022, 19(11): 2791-2800.
- [31] ROSE N D, HUNGR O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 308 - 320.
- [32] CARLÀ T, FARINA P, INTRIERI E, et al. On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine[J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 71 - 81.
- [33] CHANG Chengrui, WANG Gonghui. Creep of clayey soil induced by elevated pore-water pressure: Implication for forecasting the time of failure of rainfall-triggered landslides[J]. *Engineering Geology*, 2022, 296: 106461.
- [34] CHANG Chengrui, NODA H, XU Qiang, et al. Slow-to-fast transition and shear localization in accelerating creep of clayey soil[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(23): e2024GL111839.
- [35] VOIGHT B, CORNELIUS R R. Prospects for eruption prediction in near real-time[J]. *Nature*, 1991, 350(6320): 695 - 698.
- [36] MAIN I G. Applicability of time-to-failure analysis to accelerated strain before earthquakes and volcanic eruptions[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 139(3): F1 - F6.
- [37] CAREY J M. The Progressive development and post-failure behaviour of deep-seated landslide complexes[Ph. D. Thesis][D]. Durham: Durham University, 2011.
- [38] BAO Liulei, ZHANG Guangcheng, HU Xinli, et al. Stage division of landslide deformation and prediction of critical sliding based on inverse logistic function[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1091.
- [39] LEINAUER J, WEBER S, CICOIRA A, et al. An approach for prospective forecasting of rock slope failure time[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 253.
- [40] HITTINGER M, GOODMAN R. Finite element study of the Nevis Bluff (New Zealand) rock slope failure[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1980, 12: 231 - 245.
- [41] CARLÀ T, INTRIERI E, RASPINI F, et al. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 14137.
- [42] CARLÀ T, NOLESINI T, SOLARI L, et al. Rockfall forecasting and risk management along a major transportation corridor in the Alps through ground-based radar interferometry[J]. *Landslides*, 2019, 16(8): 1 425 - 1 435.
- [43] ZENG Peng, FENG Bing, DAI Keren, et al. Can satellite InSAR innovate the way of large landslide early warning?[J]. *Engineering Geology*, 2024, 342: 107771.
- [44] PARONUZZI P, BOLLA A, RIGO E. Brittle and ductile behavior in deep-seated landslides: learning from the Vajont experience[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(6): 2 389 - 2 411.
- [45] VOIGHT B. *Wedge Rockslides, Libby dam and lake Koocanusa, Montana*[M]. In: *Developments in Geotechnical Engineering: Vol. 14*. Elsevier, 1979: 281 - 315.
- [46] ZVELEBILL J, MOSER M. Monitoring based time-prediction of rock falls: Three case-histories[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2001, 26(2): 159 - 167.
- [47] HE Keqiang, WANG Zhiliang, MA Xiaoyun, et al. Research on the displacement response ratio of groundwater dynamic augment and its application in evaluation of the slope stability[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7): 5 773 - 5 791.
- [48] 李炼, 陈从新, 徐宜保, 等. 露天矿边坡的位移监测与滑坡预报[J].

- 岩土力学, 1997(04): 69 - 74.(LI Lian, CHEN Congxin, XU Yibao, et al. Displacement monitoring and landslide forecast on the rock slope of open-pit mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997(04): 69 - 74.(in Chinese))
- [49] KAYESA G. Prediction of slope failure at Letlhakane Mine with the Geomos slope monitoring system[C]// Proceedings of the International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering. South African: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2006.
- [50] VENTER J, KUZMANOVIC A, WESSELS S. An evaluation of the CUSUM and inverse velocity methods of failure prediction based on two open pit instabilities in the Pilbara[C]// In: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2013: 1 061 - 1 076.
- [51] CHEN Mingxi, HUANG Da, JIANG Qinghui. Slope movement classification and new insights into failure prediction based on landslide deformation evolution[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 141: 104733.
- [52] MANCONI A, GIORDAN D. Landslide failure forecast in near-real-time[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(2): 639 - 648.
- [53] ROVÀN M J, ABELLÀN A, VILAPLANA J M. Progressive failure leading to the 3 December 2013 rockfall at Puigcercós scarp (Catalonia, Spain)[J]. Landslides, 2015, 12(3): 585 - 595.
- [54] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data[J]. Landslides, 2018, 15(1): 123 - 133.
- [55] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. 工程地质学报, 2012, 20(02): 145-151.(Xu Q. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(02): 145 - 151.(in Chinese))
- [56] 董秀军, 许强, 唐川, 等. 滑坡位移-时间曲线特征的物理模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(03): 401 - 407.(DONG Xiujun, XU Qiang, TANG Chuan, et al. Characteristics of landslide displacement-time curve by physical simulation experiment[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 401 - 407.(in Chinese))
- [57] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957 - 966.(XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, Monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 - 966.(in Chinese))
- [58] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360 - 374.(XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration of practical issues[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360 - 374.(in Chinese))
- [59] LEI Qinghua, SORNETTE D. Unified failure model for landslides, rockbursts, glaciers, and volcanoes[J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6(1): 390.
- [60] LACROIX P, HANDWERGER A L, BIÈVRE G. Life and death of slow-moving landslides[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(8): 404 - 419.
- [61] BONTEMPS N, LACROIX P, LAROSE E, et al. Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 780.
- [62] ZHOU Chao, CAO Ying, YIN Kunlong, et al. Characteristic comparison of seepage-driven and buoyancy-driven landslides in Three Gorges Reservoir area, China[J]. Engineering Geology, 2022, 301: 106590.
- [63] CONTE E, TRONCONE A. Simplified Approach for the Analysis of Rainfall-Induced Shallow Landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 398 - 406.
- [64] XU Qiang, LIU Hanxiang, RAN Jiexiang, et al. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, southwestern China[J]. Landslides, 2016, 13(6): 1 555 - 1 570.
- [65] LI Zhigang, LI Weile, XU Qiang, et al. Preliminary analysis of the catastrophic February 22nd 2023 Xinjing open-pit mine landslide, Inner Mongolia, China[J]. Landslides, 2024, 21: 1 053 - 1 067.
- [66] LACROIX P, ARAUJO G, HOLLINGSWORTH J, et al. Self-entrainment motion of a slow-moving landslide inferred from Landsat-8 time series[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(5): 1 201 - 1 216.
- [67] Zhang Fanyu, Liu Gao, Chen Wenwu, et al. Human-induced landslide on a high cut slope: a case of repeated failures due to multi-excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(4): 367 - 37.
- [68] YENES M. Large landslides induced by fluvial incision in the Cenozoic Duero Basin (Spain)[J]. Geomorphology, 2015, 246: 263 - 276.
- [69] RIVA F, AGLIARDI F, AMITRANO D, et al. Damage-based time-dependent modeling of paraglacial to postglacial progressive failure of large rock slopes[J]. Journal of Geophysical Research: Earth

- Surface, 2018, 123(1): 124 - 141.
- [70] PREISIG G. Hydromechanical rock mass fatigue in deep-seated landslides accompanying seasonal variations in pore pressures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 2 333 - 2 351.
- [71] SCHULZ W H, MCKENNA J P, KIBLER J D, et al. Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide—evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion? [J]. Landslides, 2009, 6(3): 181 - 190.
- [72] ZHANG Shuai, XU Qiang, HU Zeming. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China[J]. Engineering Geology, 2016, 204: 1 - 13.
- [73] LIU C-N. Progressive failure mechanism in one-dimensional stability analysis of shallow slope failures[J]. Landslides, 2009, 6(2): 129 - 137.
- [74] CHAU K T. Landslides modeled as bifurcations of creeping slopes with nonlinear friction law[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, 32(23): 3 451 - 3 464.
- [75] HELMSTETTER A, SORNETTE D, GRASSO J-R., et al. Slider block friction model for landslides: Application to Vaiont and La Clapière landslides[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109(B2): 2002JB002160.
- [76] SINGH A K, KAINTHOLA A, SINGH T N. Prediction of factor of safety of a slope with an advanced friction model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55: 164 - 167.
- [77] MIAO H, WANG G. Prediction of landslide velocity and displacement from groundwater level changes considering the shear rate-dependent friction of sliding zone soil[J]. Engineering Geology, 2023, 327: 107361.
- [78] PAUL K, BHATTACHARYA P, MISRA S. Frictional control on accelerating creep during the slow-to-fast transition of rainfall-induced catastrophic landslides[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2024, 129(1): e2023JF007213.
- [79] MAIO C D, VASSALLO R, VALLARIO M. Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation[J]. Engineering Geology, 2013, 162: 53 - 66.
- [80] WANG Yian, LIU Dongjie, DONG Jie, et al. On the applicability of satellite SAR interferometry to landslide hazards detection in hilly areas: a case study of Shuicheng, Guizhou in Southwest China[J]. Landslides, 2021, 18(7): 2 609 - 2 619.
- [81] LEI Q, SORNETTE D. Endo-exo framework for a unifying classification of episodic landslide movements: Implications for forecasting catastrophic failures[J]. Science Advances, 2025, 11(39).
- [82] 秦四清. 滑坡前兆突变异常识别方法. 岩土力学, 2000(1): 36 - 39. (Qin Siqing. Identification approach to abrupt abnormality of landslide forerunners[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000(1): 36 - 39.(in Chinese))
- [83] 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. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2 161 - 2 172. (HE Manchao, REN Shulin, TAO Zhigang. Remote monitoring and forecasting system of Newton force for landslide geological hazards and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2 161 - 2 172.(in Chinese))
- [84] 黄润秋, 陈国庆, 唐鹏. 基于动态演化特征的锁固段型岩质滑坡前兆信息研究. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 521 - 533. (HUANG Runqiu, CHEN Guoqing, TANG Peng. Precursor information of locking segment landslides based on transient characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 521 - 533.(in Chinese))