

顺层路堑滑坡灾变演化分析及变形预警研究

Analysis of the Evolution Process and Deformation Warning of Landslides in Layered Cutting Landslides

任庆国，苗兰弟

(陕西铁路工程职业技术学院，渭南 714000)

摘要：为确保公路安全施工及运营，以某顺层路堑滑坡为工程背景，开展此类滑坡灾变成因及演化流程分析，并以变形监测数据为基础，在其数据去噪处理基础上，通过稳定状态、变形及速率判据综合开展滑坡变形预警分级研究。结果表明：路堑滑坡的变形特征显著，灾害成因较为完备，且此路堑滑坡的演化流程也较为清晰；GA-Kalman 滤波能有效实现滑坡变形数据去噪处理，相对其他方法优越性显著，并经三类判据综合预警分析，路堑滑坡复活段的预警等级属Ⅲ~Ⅳ级，未复活段的预警等级为Ⅰ级。研究成果可为类似滑坡工程提供参考。

关键词：路堑滑坡；灾变成因；演化流程；预警研究

中图分类号：P642 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-8249(2025)06-0066-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.012

REN Qingguo, MIAO Landi

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: To ensure the safe construction and operation of highways, taking a certain layered road cut landslide as the engineering background, this study first analyzes the causes and evolution process of such landslide disasters. Based on deformation monitoring data, on the basis of data denoising processing, a comprehensive study on landslide deformation warning and grading is carried out through stable state, deformation, and rate criteria. The results indicate that the deformation characteristics of road cut landslides are significant, the causes of disasters are relatively complete, and the evolution process of this road cut landslide is also relatively clear; GA Kalman filtering can effectively achieve denoising of landslide deformation data, with significant advantages over other methods. After comprehensive warning analysis based on three criteria, the warning level of the resurgent section of the road cut landslide belongs to level III~IV, and the warning level of the non resurgent section is level I. Overall, the stability of the resurfacing section of the road cut landslide is poor. The research results can provide reference for similar landslide projects.

Key words: cutting landslide; causes of disaster; evolution process; early warning research

0 引言

在道路工程建设过程中，受地形条件限制，会形成一定规模的路堑，且由于路堑开挖，会改变施工区的原始地形地貌，造成其坡体应力改变，若未及时采取防治措施，极易导致路堑局部抗滑能力减弱，诱发老滑坡复活，因此，对路堑滑坡灾害研究

作者简介：任庆国（1980—），男，硕士，副教授，研究方向：桥梁施工技术与控制。

收稿日期：2024-06-06

具有较强的现实意义^[1-2]。

目前，已有不少学者开展了路堑滑坡的相关研究，如马坤等^[3]利用模型试验开展了土体含水率对路堑滑坡的影响规律，即土体含水率越大，滑坡稳定性越差；陈爱云等^[4]利用室内试验开展了路堑边坡的蠕变规律分析，得出当水平剪切应力增加时，瞬时蠕变量具先减小后增大特征；侯李杰等^[5]基于红层路堑滑坡现场调查及勘察成果，总结了该类灾害的成因；吴昊城等^[6]利用层次分析法等构建了超高路堑滑坡的风险评价体系，为定量掌握该类路堑滑坡的风险状态提供了一种思路。上述研究为路堑滑坡积累了一定经验，但限于项目所处地质条件差异，加之较少涉及路堑滑坡灾变演化分析及预警研究，因此，仍有必要结合具体实例进一步拓展研究。

目前涉及路堑滑坡灾变演化分析的研究成果较少，因此，提出重点从滑坡灾变成因、演化流程两方面入手分析，旨在为后续防治奠定理论基础。同时，结合工程实际，路堑施工过程中的变形监测是必要的，且由宁波等^[7]、耿海深等^[8]的研究成果表明滑坡变形能很大程度上反馈滑坡稳定状态，那么基于路堑滑坡变形数据基础上的预警方法构建亦具可行性。一般来说，岩土类工程在施工过程中的变形预警多是从累计变形和变形速率两方面入手，缺乏基于变形数据基础上的稳定性评价，因此，提出将路堑滑坡的预警判据划分为稳定状态判据、变形判据及速率判据，即以此三类判据分别进行预警分级，最后按照不利原则确定出综合预警分级结果。需注意的是，李晓斌等^[9-11]研究得出滑坡变形监测数据中会含有一定的噪声信息，这可能会对预警结果造成影响，那么在预警判据构建前的变形数据去噪处理就显得格外重要。王娟等^[12-13]的研究成果表明 Kalman 滤波在变形数据去噪处理过程中具有较强的适用性，可以对其进行路堑滑坡变形数据的预处理。

综合上述，以某顺层路堑滑坡为工程背景，开展此类滑坡灾变成因及演化流程分析，并以变形监测数据为基础，在其数据去噪处理基础上，通过稳定状态判据、变形判据及速率判据综合开展滑坡变形预警分级研究，以期为后续安全施工及运营提供一定的理论指导。

1 工程概况

1.1 滑坡基本特征

受 K15 + 650 m ~ K15 + 850 m 段施工影响，诱发复活了路堑滑坡。此路堑滑坡是由老滑坡局部复活形成，其中，老滑坡纵向长度为 230 m，横向宽度 110 m，厚度介于 5.0 ~ 8.5 m，平均值为 7.0 m，体积约 $17.71 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，属中型滑坡；复活体位于滑坡中前缘，纵向长度为 120 m，横向宽度 120 m，平均厚度为 7.5 m，体积约 $10.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，具有中型滑坡规模。如图 1 所示。

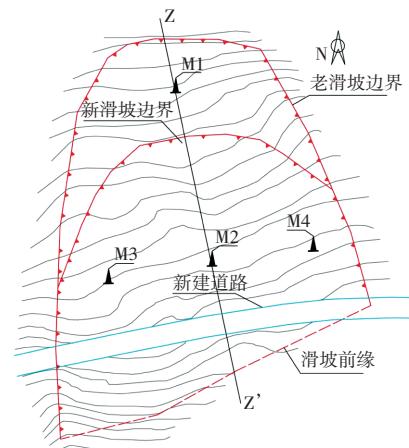


图 1 滑坡平面形态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of landslide plane morphology

滑坡地层结构特征为：滑体土岩性为粉质黏土，可塑~硬塑，厚度介于 5.0 ~ 8.5 m，含有少量块石，结构较松散，均匀性较差，压缩性较高。滑带土岩性为粉质黏土，紫红色，可塑，厚度 10 ~ 25 cm，夹杂少量角砾，含量少于 5%，多为次圆状~圆状。滑床岩性为泥岩，紫红色，强~中风化，产状为 $197^\circ \angle 18^\circ$ ，质软，遇水易软化。滑坡地层结构示意图如图 2 所示。

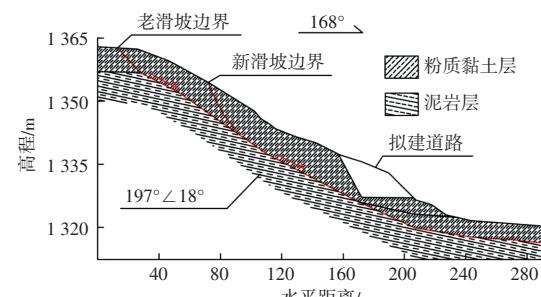


图 2 滑坡地层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of landslide geological structure

岩土力学

1.2 滑坡变形特征

经调查,老滑坡在2021年道路修建过程中引发了局部复活,为量化评价滑坡变形特征,于滑坡地表布设了4个监测点(如图1所示),按照1天1次的监测频率,共计得到39期变形数据,得其时间-变形曲线如图3所示。随时间持续,4个监测点的累计变形具持续增加趋势,前期增加速率相对较小,后续增加速率相对略大。

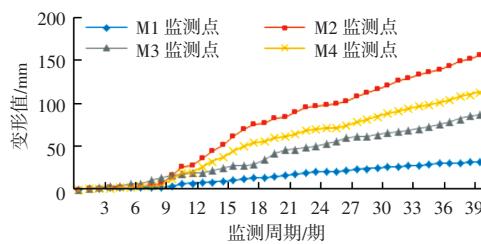


图3 滑坡时间-变形曲线

Fig. 3 Landslide time deformation curve

2 滑坡灾变演化分析

2.1 滑坡灾变成因分析

2.1.1 内部成因分析

(1) 地形地貌成因 滑坡区具丘陵地貌,沟谷较为发育,原始斜坡坡度介于 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$,本身已具有滑坡形成条件,且由于已形成了老滑坡,地表形态利于降雨汇集,会增加降雨入渗可能。

(2) 坡体结构成因 滑坡主滑方向为 168° ,岩层产状为 $197^{\circ}\angle 18^{\circ}$,顺向坡坡体结构,易形成软弱结构面,且滑坡区地层属红层,软弱地层也较发育;由于软弱夹层存在,经地质构造反复作用,易形成潜在滑面,这也是造成老滑坡形成的重要成因。

(3) 地层岩性成因 滑坡区土层岩性为粉质黏土,基岩为泥岩,两者均具有较强的亲水性,质软,遇水易软化,且此类地层易形成软弱结构面,为滑坡形成、复活奠定了条件。

(4) 水文地质成因 滑坡区地层的富水性相对较小,但其也具有相应的储水构造、水力通道等,且鉴于滑坡区降雨较为充沛,使得滑坡区局部富水性也较强,这可能造成地层长期软化,为滑坡局部复活奠定条件。

2.1.2 外部成因分析

(1) 降雨成因 项目所在区域降雨量介于800~

1 200 mm,且降雨集中于6~9月,其降雨量占全年降雨量的50%~60%,雨水充沛,且具有集中降雨特征。在降雨条件下,滑体重度会增加,增大下滑力,且降雨入渗滑带后,还会减弱其抗剪参数,减弱其抗滑力;除此之外,降雨入渗后还可能会于坡体内形成渗流、静水压力,这不仅会造成坡体结构破坏,还会减弱滑坡稳定性。

(2) 施工扰动成因 滑坡区的工程活动主要是道路建设,一方面,道路位于滑坡前缘,其开挖后会减弱前缘抗滑力,降低滑坡稳定性;另一方面,道路修建会将坡体内部的应力平衡打破,造成局部土体应力松弛,诱发了局部垮塌破坏。

据上,滑坡内部成因是滑坡形成的重要依据,外部成因是其复活的直接诱因。

2.2 滑坡演化流程分析

路堑滑坡演化流程可划分为4个阶段(如图4所示):

(1) 斜坡形成原始阶段 滑坡区内岩层具软岩特征,岩层软硬互层,岩性不均匀,具多源层状规律,岩层倾角相对较缓。在路堑滑坡原始地形地貌形成基础上,地表浅层卸荷裂隙、风化裂隙逐步发育,形成了规模不一的裂缝,为降雨入渗提供了初步通道。

(2) 岩体劣化损伤阶段 由于路堑滑坡浅表层裂缝发育,加之在基础上存在软弱结构面,受地震、降雨等因素长期影响,会造成浅表层岩体出现裂解损伤,软弱结构面也随之扩展;随时间持续,浅表裂缝深度也随之扩展,其裂缝逐步汇合及贯通,并可能于裂缝内形成静水压力,反向促使裂缝扩展。

(3) 斜坡弱化蠕变阶段 由于路堑滑坡浅表层地层已出现裂解损伤,加之其遇水易软化,受降雨、地下水等因素长期作用,地表岩石逐步演化成为土体,即老滑坡滑体逐步形成;其次,软弱结构面受降雨入渗等影响,滑面逐步形成,致使老滑坡滑体出现软化蠕滑等现象,即老滑坡形成。

(4) 道路修建激发复活阶段 当滑坡前缘道路修建时,减弱前缘抗滑力,并破坏坡体内部的应力平衡,激发了路堑滑坡局部复活,即造成滑坡。

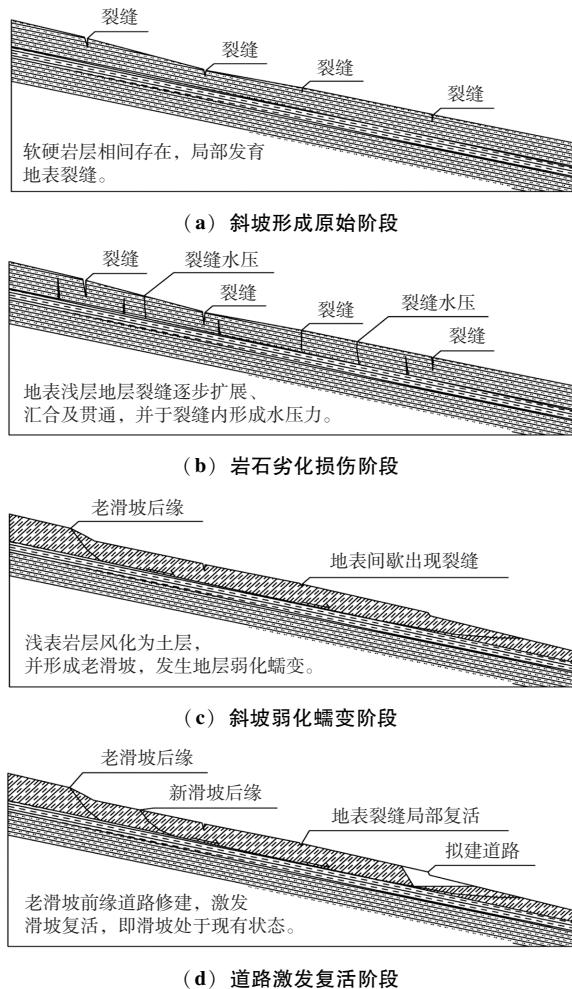


图4 老滑坡演化流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the evolution process of the old landslide

3 滑坡变形预警研究

3.1 预警方法构建

以变形监测数据为基础，在数据去噪处理基础上，通过稳定状态判据、变形判据及速率判据综合开展滑坡变形预警分级研究。

3.1.1 变形数据的去噪模型构建

在滑坡变形监测过程中，受各类因素影响，监测数据会含有噪声信息，即滑坡变形监测数据 f_i ：

$$f_i = z_i + s_i \quad (1)$$

式中： z_i 为滑坡变形数据的真实变形信息； s_i 为滑坡变形数据的噪声变形信息。

欲实现滑坡变形数据的去噪处理，提出通过 Kalman 滤波构建去噪模型。据文献 [13] 的应用研究，状态噪声矩阵、观测噪声矩阵会对去噪效果造

成影响，为保证数据去噪效果，再进一步通过遗传算法（Genetic Algorithm, GA）开展此两矩阵的寻优处理。因此，将滑坡变形数据的去噪模型构建为 GA-Kalman 滤波，且结合文献 [14] 成果，将降噪误差比 $dnSNR$ 作为数据去噪效果评价指标，其值越小，说明数据去噪效果越优。

3.1.2 滑坡变形预警判据的构建

在滑坡变形预警过程中，预警判据由稳定状态判据、变形判据、速率判据构建。采用 GA-Kalman 滤波对滑坡变形数据的去噪处理，可将其变形数据分解为变形数据分量 1 和变形数据分量 2，并将变形数据分量 1 作为滑坡变形预警的基础数据（主要用于稳定状态判据和速率判据）。

(1) 稳定状态判据的构建 根据以往研究，尖点突变分析可通过变形数据的突发质变分析来评价滑坡稳定性，因此，提出通过尖点突变分析来构建稳定状态判据。

由尖点突变分析的基本原理，将其标准函数 $V(t)$ 表示为：

$$V(t) = t^4 + qt^2 + pt \quad (2)$$

式中： q, p 为突变特征参数； t 为时间参数。

以滑坡变形数据分量 1 为基础，通过拟合即可得到相应的突变特征参数，并进一步计算突变特征值 Δ ：

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

根据 Δ 值进行滑坡稳定状态评价，若 $\Delta < 0$ ，说明滑坡属不稳定状态；若 $\Delta = 0$ ，说明滑坡属稳定临界状态；若 $\Delta > 0$ ，说明滑坡属稳定状态。当滑坡处于稳定状态时， Δ 值越小，滑坡所处稳定性越差。

(2) 变形判据的构建 一般来说，滑坡某位置处的变形达到一定值（极限变形值）时，即会出现变形破坏，那么滑坡累计变形值越接近极限变形值，其危险性越高，预警等级也就越大，因此，构建变形判据指标 F_l 为：

$$F_l = S_k / S_j \quad (4)$$

式中： S_k 为相应 k 时刻的累计变形值； S_j 为对应监测点的极限变形值。

计算 F_l 值，需先计算 S_j 值，其计算公式^[15]表示为：

$$y_t = M e^{-N/t} \quad (5)$$

岩土力学

式中: y_t 为对应 t 时刻的变形值; t 为时间参数; M 、 N 为变形特征参数。当时间参数 t 趋近于无穷大时, 式(5)趋近于极大值 M , 可将其作为极限变形值 S_j 。

(3) 速率判据的构建 通过非趋势波动分析方法(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)构建速率判据, 其原理介绍详见文献[16], 此处不再赘述。通过 DFA 分析, 求得标度指数 a , 利用其开展滑坡变形速率趋势判别。一般来说, a 值介于 0~1 之间, 当 $a < 0.5$ 时, 滑坡变形速率具减小趋势; 当 $a = 0.5$

时, 滑坡变形速率属临界状态, 无法判断其变形趋势; 当 $a > 0.5$ 时, 滑坡变形速率具增加趋势。当 a 值与 0.5 的差值 d 越大, 相应的趋势性越强, 因此, 以参数 d 构建变形速率的趋势等级, 见表 1。通过稳定状态判据、变形判据及速率判据划分滑坡变形预警等级, 见表 2。

表 1 变形速率的趋势等级标准

Table 1 Trend level standards for deformation rate

$d < 0.17$	$0.17 \leq d < 0.33$	$d \geq 0.33$
1 级	2 级	3 级

表 2 滑坡变形预警等级标准

Table 2 Landslide deformation warning level standards

预警等级	稳定状态判据	变形判据	速率判据	应对措施
I 级	稳定	$F_l \leq 0.50$	减小趋势且趋势等级为 3 级	滑坡稳定性较好, 无需采取特殊措施, 正常监测、群防群策即可。
II 级	稳定	$0.50 < F_l \leq 0.65$	减小趋势且趋势等级为 2 级	滑坡稳定性一般, 暂可不采取特殊措施, 但需加强监测及群防群策工作。
III 级	稳定	$0.65 < F_l \leq 0.80$	减小趋势且趋势等级为 1 级	滑坡稳定性略差, 需构建防治预案, 必要条件下实施, 并加强监测及群防群策工作。
IV 级	不稳定	$F_l > 0.80$	增加趋势	滑坡稳定性很差, 需在加强监测及群防群策工作同时, 立即开展防治处理。

注: 3 类判据综合确定最终的预警等级。

3.2 变形数据去噪结果

首先, 经试算统计, Kalman、GA-Kalman、sym 小波、db 小波的 dnSNR 值分别为 32.57、23.10、33.49 和 30.62, 充分说明 GA-Kalman 的去噪效果最好。因此, 采用 GA-Kalman 滤波将滑坡变形数据分解为数据分量 1 和数据分量 2。

3.3 变形预警结果

(1) 稳定状态判据结果 以各监测点的变形数据分量 1 为基础, 通过尖点突变分析开展其稳定状态分析, 结果见表 3。M1~M4 的拟合度介于 0.930~0.952, 具有较优的拟合精度, 且所得 Δ 值介于 $6.208 \times 10^4 \sim 8.511 \times 10^5$, 均大于 0, 说明其均处于稳定状态; 按照 Δ 值大小, 将 4 个监测点的稳定程度排序为: M1 > M4 > M3 > M2。4 个监测点的预警等级属 I~III 级。

(2) 变形判据结果 变形判据结果见表 4。在变形判据条件下, 4 个监测点的拟合度范围为 0.912~0.946, 拟合效果也较优, 说明其后续计算得到的极限变形值具较高可信度。

表 3 稳定状态判据的结果

Table 3 Results of stable state criteria

监测点	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	稳定程度排序
M1	$y = t^4 - 104t^2 + 604t$	0.946	-104	604	8.511×10^5	稳定	1
M2	$y = t^4 - 115t^2 + 673t$	0.930	-115	673	6.208×10^4	稳定	4
M3	$y = t^4 - 103t^2 + 575t$	0.952	-103	575	1.851×10^5	稳定	3
M4	$y = t^4 - 108t^2 + 623t$	0.941	-108	623	4.018×10^5	稳定	2

表 4 变形判据的结果

Table 4 Results of deformation criteria

监测点	拟合方程	拟合度	现有变形 值/mm	极限变形 值/mm	预警系 数	预警等 级
M1	$y = 156.90\exp(-16.89/t)$	0.912	31.69	192.08	0.165	I 级
M2	$y = 214.99\exp(-36.16/t)$	0.946	155.87	214.99	0.725	III 级
M3	$y = 185.78\exp(-24.73/t)$	0.928	86.76	185.78	0.467	I 级
M4	$y = 181.36\exp(-30.82/t)$	0.930	112.81	181.36	0.622	II 级

(3) 速率判据结果 以各监测点的变形数据分量 1 为基础, 通过 DFA 分析得到速率判据, 结果见表 5。在速率判据结果中, 4 个监测点的预警等级介于 II~IV 级。

(4) 变形预警的最终结果 以上述三类判据结果为基础, 得到 4 个监测点的最终预警等级, 结果见表 6。M1 的最终预警等级为 I 级, M2、M3 的最

表5 速率判据的结果

Table 5 Results of rate criterion

监测点	a 指数	趋势等级	趋势方向	预警等级
M1	0.133	3 级	减小	Ⅲ级
M2	0.317	2 级	减小	Ⅱ级
M3	0.482	1 级	减小	Ⅲ级
M4	0.513	1 级	增加	Ⅳ级

表6 滑坡变形最终预警结果

Table 6 Final warning results of landslide deformation

监测点	单项判据的预警结果			最终预警结果
	稳定状态判据	变形判据	速率判据	
M1	I~Ⅲ级	I 级	I 级	I 级
M2	I~Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅲ级
M3	I~Ⅲ级	I 级	Ⅲ级	Ⅲ级
M4	I~Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅳ级	Ⅳ级

终预警等级为Ⅲ级, M4 的最终预警等级为Ⅳ级。

据上, 路堑滑坡复活段的预警等级介于Ⅲ~Ⅳ级, 说明其变形程度较高, 建议按Ⅳ级进行预警防治, 即滑坡稳定性很差, 需在加强监测及群防群策工作同时, 立即开展其防治处理; 路堑滑坡未复活段的预警等级为I 级, 此范围内的滑坡稳定性较好, 无需采取特殊措施。

4 结论

通过顺层路堑滑坡灾变演化流程分析及预警研究, 得到以下主要结论为:

(1) 经调查, 路堑滑坡的变形特征显著, 内部成因主要包括地形地貌、坡体结构、地层岩性及水文地质; 外部成因主要包括降雨及施工扰动。同时, 此路堑滑坡的演化流程也较为清晰。

(2) GA-Kalman 滤波的去噪效果明显优于 sym 小波、db 小波的去噪效果。

(3) 通过稳定状态判据、变形判据及速率判据的综合评价, 得到路堑滑坡复活段的预警等级介于Ⅲ~Ⅳ级, 说明其滑坡稳定性很差; 路堑滑坡未复活段的预警等级为I 级, 此范围内的滑坡稳定性较好。

参 考 文 献

- [1] 谭家华, 张吉怀. 高速铁路深路堑边坡失稳机理及治理措施 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (7): 138~143.
- [2] 彭浩然, 廖小平. 广东某高速公路路堑边坡滑坡灾变过程及工程对策 [J]. 公路, 2023, 68 (3): 1~7.
- [3] 马坤, 张永谋, 吴红刚, 等. 基于多传感器数据融合分析的路堑滑坡模型试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42 (4): 653~663.
- [4] 陈爱云, 龚标, 杨宇轩, 等. 云南宣威群地层路堑边坡滑带土蠕变特性研究 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29 (1): 111~118.
- [5] 侯李杰, 张玉芳, 刘洪瑜, 等. 西南地区红层滑坡致灾成因及致灾模式研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (2): 71~74.
- [6] 吴昊城, 王浩, 黄晓毅, 等. 超高路堑边坡施工过程的定量风险评估 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (7): 45~53.
- [7] 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.
- [8] 耿海深, 吕文斌, 栗燊, 等. 滑坡失稳机理分析及预警预测研究 [J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2021, 57 (6): 103~109.
- [9] 李晓斌, 白海军. 变质岩区大型高位滑坡的变形监测预报研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43 (10): 1045~1050.
- [10] 康会宾. 基于误差补偿智能预测模型的滑坡变形预测研究 [J]. 人民长江, 2020, 51 (9): 122~128.
- [11] 王兴科, 王娟. 综合图形权值法在滑坡变形预测中的应用研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34 (7): 82~86, 93.
- [12] 王娟, 王兴科. 软土地区基坑侧位移变形预警及预测 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (8): 91~96, 103.
- [13] 王成, 何美琳, 覃婕, 等. 半参数 Kalman 滤波模型在 GPS 变形数据处理中的应用 [J]. 施工技术, 2015, 44 (增刊2): 818~821.
- [14] 郝付军. 运营桥梁的变形程度评价和预测分析 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42 (4): 121~126, 137.
- [15] 鞠兴华, 刘禹阳. 基于多元信息融合的基坑预警分级研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52 (1): 129~136.
- [16] 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.