

普贤乡场滑坡成因机制分析及稳定性评价

熊骏¹, 熊太友², 阮正峰¹, 华勇³, 周旭萌³, 郭婷婷¹

(1. 昆明理工大学, 昆明 650093;

2. 东方地球物理勘探有限公司, 成都 610213;

3. 云南地矿地质工程有限公司, 昆明 650093)

摘要: 普贤乡场滑坡位于四川省广元市普贤乡场镇, 为了解决该滑坡带来的财产损失及安全威胁, 基于该滑坡所在区域地形地貌及滑坡体的基本特征进行大量研究。本文采用极限平衡法对普贤乡场滑坡, 分3种工况进行了稳定性研究。计算结果表明: 滑坡在天然工况及地震工况下处于稳定状态, 在暴雨工况下处于欠稳定状态, 并提出采用改沟及弃渣回填工程+抗滑桩+拉裂缝封填相结合的防治措施。

关键词: 滑坡; 地质灾害; 成因机制; 稳定性

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

MECHANISM ANALYSIS AND STABILITY EVALUATION OF LANDSLIDE IN PUXIAN TOWNSHIP

XIONG Tao¹, XIONG Tai-you², RUAN Zheng-feng¹, HUA Yong³, ZHUO Xu-meng³, GUO Ting-ting¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Dongfang Geophysical Exploration Co., Ltd., Chengdu 610213, China;

3. Yunnan Geological Engineering Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Kunming 650093, China)

Abstract: Puxian Township landslide is located in Puxian Township, Guangyuan City, Sichuan Province. In order to solve the property loss and security threat caused by the landslide, a large number of studies have been carried out based on the topography and basic characteristics of the landslide area. In this paper, the limit equilibrium method is used to study the stability of landslide in Puxian township. The calculation results show that the landslide is in a stable state under natural and seismic conditions, and in an under stable state under heavy rain conditions. The prevention and control measures of ditch modification and slag back filling project + anti-slide pile + tensile crack sealing are proposed.

Key words: landslide; geological hazard; genetic mechanism; stability

当前国内外大量学者针对各种类型滑坡的影响因素、启动机理、稳定性评价及防治措施等进行了大量研究^[1-20]。

普贤乡场滑坡位于四川省广元市普贤乡场镇。

在极端降雨条件下, 普贤乡场滑坡发生了明显滑动, 滑坡后缘出现裂缝, 前缘发现明显变形, 因此推断该滑坡可能处于欠稳定状态, 形势已经十分严峻, 已经严重威胁前方房屋及街道上民众安全。本文采用极

限平衡法对普贤乡场滑坡,分3种工况进行了稳定性研究,并结合相关理论提出针对该滑坡的防治建议,为类似滑坡提供参考依据。

1 地形与地质条件

普贤乡场滑坡位于广元市昭化区普贤乡场镇,地理坐标东经 $105^{\circ}56'2.91''$,北纬 $32^{\circ}11'2.10''$ 。滑坡前方为政府大楼及场镇街道,地形平缓,后有村道经过,滑坡区内交通条件较好。滑坡区为斜坡地貌,北高南低,滑坡后缘高程 815 m 左右,前缘高程 800 m 左右,高差约 15 m,滑坡区整体坡度 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,局部发育陡坎及平台,滑坡后方坡度较缓,平均 25° 。场区内分布主要地层为第四系滑坡堆积层 (Q_4^{del}),第四系人工堆积层 (Q_4^{ml}),侏罗系上统蓬莱镇组 (J_3p)。

滑坡区属四川中坳陷燕山褶皱区,构造线展布方向为北东向。区内构造较为简单,构造形态主要表现为舒缓宽展的褶皱。其组成地层为侏罗系和白垩系。滑坡区主要背斜和向斜有:盐店场向斜、北庙场背斜;走马岭向斜、河湾场背斜。两翼产状平缓,一般为 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}$,个别为 13° 。向斜扬起和背斜倾伏端倾角 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。滑坡区主要发育两组构造裂隙,北东-北东东向裂隙,北西-北北西向裂隙,两组裂隙相互切割。节理类型有层面节理、风化节理及构造节理。

滑坡区紧邻龙门山地震带,距南坪、松潘、汶川、平武等地强震震中约 50~150 km,故历次地震均受波及。这些地震活动对工作区地质灾害的发生具有一定的诱发作用。

2008年汶川地震发生于龙门山断裂带上,由于断裂的破裂是从映秀向北延伸,昭化区距发震断裂较近,受地震影响强烈,造成不可估量的损失。

根据区域水文地质资料,滑坡区地下水类型主要为第四系松散层孔隙水和基岩裂隙水。第四系松散孔隙水主要分布在松散堆积层中,结构松散,易于大气降雨的入渗,其排泄方式为沿斜坡向地势低洼的地方排泄。基岩裂隙水赋存于滑坡区的泥质粉砂岩裂隙中,主要靠大气降水补给,地下水储量随季节变化大,其动态变化大,据访问,暴雨期间,滑坡前缘有大量裂隙水流出。该类地下水赋存量变化较大,补给量大时赋存量小,但补给停止后,迅速排泄,赋存量小。游离 CO_2 含量 7.92 mg/l ,侵蚀性 CO_2 含量为 0 mg/l ,pH 值 7.1,呈弱碱性。区内地下水对钢筋混凝土结构侵蚀弱。

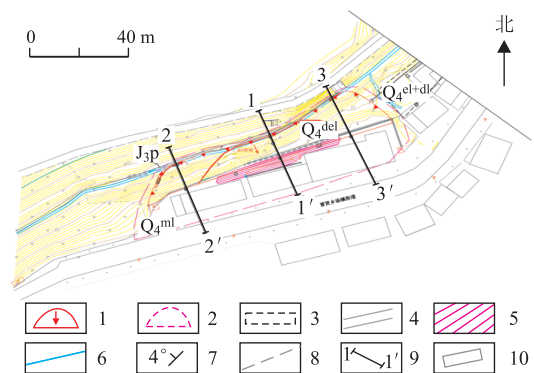
由于滑坡区位于场镇街道旁,所以区内人类工

程活动较强烈,主要表现为场镇建设。场镇建设主要集中于滑坡区下部地带,场镇建设对斜坡坡脚进行开挖,形成临空面,临空面一般高 2~5 m 不等,为灾害体的形成提供了较好的临空条件。灌溉水渠沿滑坡后缘通过,受滑坡滑动影响,目前已产生强烈变形。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡地貌形态及边界特征

滑坡位于普贤乡政府后侧斜坡地带,滑坡平面呈圈椅状。滑坡横向长 110 m,纵向长 13~25 m,滑坡体均厚 9 m,方量 $2.48\times 10^4\text{ m}^3$,为小型基岩滑坡。滑坡后边界至拉裂渠道地带,前缘至斜坡前方陡缓交界地带,西侧以裂缝为界,东侧至山脊微地貌地带。总体情况来看,滑坡周界明显,前缘建筑物主要为政府大楼。目前稳定性差,极端降雨情况可能再次形成滑坡(图 1)。



J_3p . 侏罗系上统蓬莱镇组; Q_4^{del} . 第四系滑坡堆积物; Q_4^{ml} . 第四系人工填土; Q_4^{el+dl} . 第四系残坡积; 1. 滑坡区范围; 2. 危险区; 3. 破坏挡墙; 4. 道路; 5. 鼓胀变形; 6. 水沟; 7. 岩层产状; 8. 地质界线; 9. 剖面线及编号; 10. 已有建筑

图 1 滑坡平面图

滑坡体变形迹象明显,边界清晰,主要变形迹象为滑坡周边及水沟开裂下错,滑坡前缘挡墙出现横向剪切裂缝及前缘地面隆起。滑坡前缘变形特征较明显,变形主要集中于前缘挡墙墙体、墙前地面、阶沿栏杆及陡坎地带,变形点主要有 4 处(BX1, BX2, BX3, BX4, 见图 3~图 6)。滑坡后缘变形主要表现为出现贯通性较好的裂缝 L1 和断续的 L2、L3 裂缝(图 8~图 10)。裂缝引起地表开裂及后缘渠道底部拉裂(图 2,图 7)。

目前滑坡已出现开裂下错、前缘挡墙破坏及地面隆起。据访问,滑坡变形时前缘有大量地下水涌出,综合分析,宏观判断滑坡出现整体滑动变形,滑动面贯通性好,滑坡当前处于欠稳定-不稳定状态。

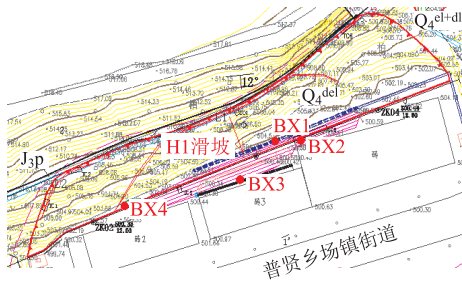


图 2 滑坡前缘变形点分布图



图 6 BX4 陡坎垮塌现象



图 3 BX1 挡墙中上部横向剪切裂缝

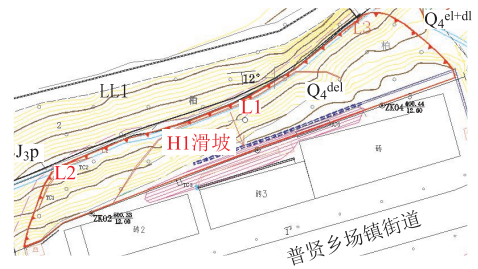


图 7 滑坡中后部裂缝分布图



图 4 BX2 墙前地面隆起



图 8 L1 裂缝引起渠道开裂



图 5 BX3 阶沿隆起、栏杆倾倒



图 9 L2 裂缝引起渠道开裂

2.2 滑坡物质组成及结构特征

滑坡后部探槽揭露滑坡控制结构面,倾向 $140^{\circ} \sim 145^{\circ}$,倾角 $76^{\circ} \sim 88^{\circ}$,拉裂缝贯入度大于 50 cm,探槽揭露滑坡后缘下错 0.3 m 左右,形成张拉裂缝宽 3~7 cm。

根据滑坡区钻孔及探槽揭露的地质条件,综合判定滑床为下部结构完整、岩质较硬的泥质粉砂岩,

细粒结构,中厚层状,岩层产状 $170^{\circ} \angle 12^{\circ}$ 。钻探取芯也较完整,岩芯多呈长柱状,未出现软弱夹层。

滑坡滑体表层为土体,下部为岩体组成。表层土体岩性为粉质粘土夹碎块石,厚 1~1.5 m,褐红色,可塑状,含碎块石,块径 30~50 cm,石质成分多为泥岩及泥质粉砂岩,含量 30%左右。下部岩体主



图 10 L3 裂缝引起渠道开裂

要为泥质粉砂岩,均厚 5~13 m,细粒结构,中厚层状构造,夹泥岩夹层,厚 20~30 cm,泥质结构,薄层状构造,岩质较软,遇水易软化呈土状。

滑带土岩性为粉质粘土,红褐色,以粘粒为主,厚度约 3~5 cm,处于饱水状态,受地下水软化呈土状,手捏粘性较强,手感细腻,遇水润滑感增强。与此对应陡坎地带挡墙出现 2 条横向剪切裂缝,中部裂缝长 33 m,错距 1~2 cm,下部裂缝长 35 m,错距 3~5 cm。

通过钻孔发现 3 处软弱夹层,分布于钻孔 4.4~4.5 m、5.1~5.3 m 和 6.6~6.8 m 段,软弱夹层呈土状,手捏粘性较强,含细角砾,块径 1~2 mm 不等,含量 5% 左右,呈棱角状,骨架成分为泥岩。对照滑坡区内地层产状综合判定,该 3 处软弱夹层对应 3 层滑动面。

滑坡 3 层滑动面中,1# 滑动面在滑坡前缘西侧有一定出露,在挡墙上产生横向剪切裂缝,错距较小且不连续;2# 滑动面在滑坡前缘地带出露良好,受其影响,滑坡前缘现有挡墙横向剪切裂缝贯通良好,错距最大;3# 滑动面滑动引起的变形迹象主要集中于滑坡前缘中部地带,两侧变形迹象不明显;由于 2# 滑动面在前缘表现出贯通性较好,变形最为明显,综合判定 2# 滑动面为主滑动面。

3 滑坡成因机制分析

滑坡形成的主要因素有地形地貌因素、地层岩性、降雨及人类工程活动等。滑坡泥质粉砂岩岩体节理裂隙发育,天然降水沿节理裂隙界面下渗进入岩体中泥质夹层地带,一方面降低了泥质较弱层的力学强度,另一方面在后缘裂隙面形成水压力,在滑坡重力及后部裂隙水压力综合作用下,滑坡出现滑动变形。滑坡区为斜坡地貌,坡度 30°~50°,为滑坡的形成提供了地形地貌条件。滑坡所在边坡由表层土体及下伏厚层状泥质粉砂岩夹薄层状泥岩构成,泥岩受节理裂隙切割,岩体较破碎,为滑坡的形成提供了良好的岩性条件。大气降雨沿岩体节理裂隙面

进入基岩内部,造成岩体力学强度降低,有时会形成较大的水压力,降低滑坡稳定性,为滑坡形成的主要诱发因素。区内人类工程活动对坡脚进行了一定开挖,形成了陡峭的临空面,临空面高 3~6 m,为滑坡的形成提供了较好临空条件。

4 滑坡的稳定性分析评价

4.1 土体物理力学性质

根据斜坡的土体物质结构特征差异较小,本次勘查取样位置主要在滑坡区,采用室内试验手段,获取土体相关物理力学指标。

本次勘查土体的物理力学指标主要采用取样室内试验和利用附近工程经验数据。滑带土体的天然重度 20.3 kN/m³,饱和重度 20.5 kN/m³,孔隙比 0.7;含水率标准值 23.93%;液性指数平均值为 0.33。粉质粘土天然峰值抗剪强度: $C = 30.56$ kPa, $\varphi = 14.59^\circ$;饱和峰值抗剪强度: $C = 24.52$ kPa, $\varphi = 11.81^\circ$;天然残值抗剪强度: $C = 19.32$ kPa, $\varphi = 12.08^\circ$;饱和残值抗剪强度: $C = 15.22$ kPa, $\varphi = 9.81^\circ$ 。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010),工作区地震设防基本烈度为Ⅶ度,地震动峰值加速度为 0.10 g。

4.2 计算剖面

本次滑坡勘查选择 1-1'(图 11)、2-2'(图 12)、3-3'(图 13),各剖面的布置情况见平面图(图 1)。

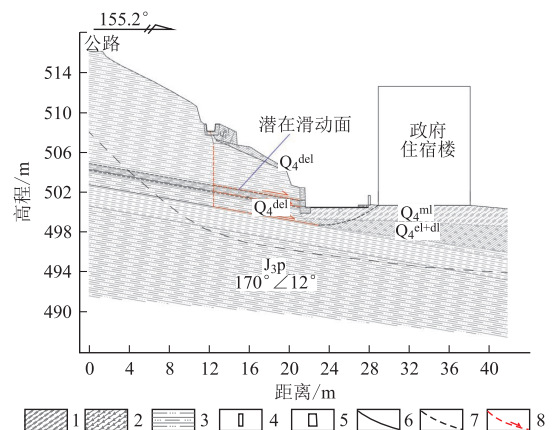


图 11 1-1'工程地质剖面图(比例尺 1:200)

4.3 计算工况

根据滑坡区具体情况,为全面分析滑坡整体所处的各种工况下的稳定状态,本次稳定性分析采用 3 种工况进行计算分析:

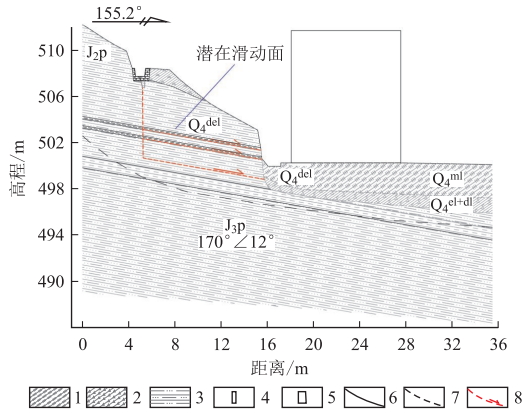


图 12 2-2'工程地质剖面图(比例尺 1:200)

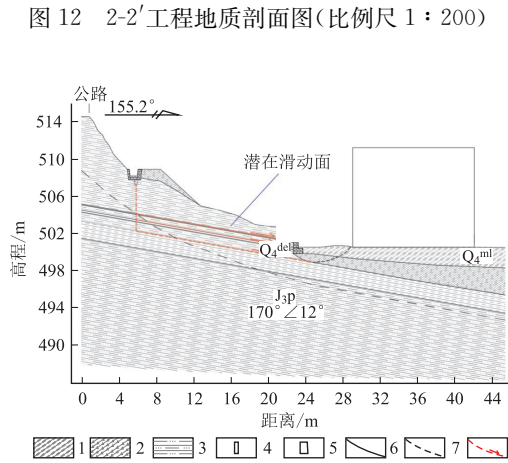


图 13 3-3'工程地质剖面图(比例尺 1:200)

工况 I (天然工况): 计算和评价时考虑荷载为: 自重+现状地下水;安全系数取 1.25。

工况 II (暴雨工况): 计算和评价时考虑荷载组合为: 自重+地下水;安全系数取 1.10。

工况 III (地震工况): 计算和评价时考虑荷载组合为: 自重+现状地下水+地震。安全系数取 1.05。

4.4 计算方法

极限平衡法计算公式如下:

$$K_f = \frac{[W(\cos \alpha - A \sin \alpha) - V \sin \alpha - U] \tan \varphi + CL}{W(\sin \alpha + A \cos \alpha) + V \cos \alpha}$$

式中, W 为岩块的重量 (kN/m); α 为滑面倾角 ($^\circ$); A 为地震加速度 (重力加速度 g); C 为岩石的内聚力 (kPa); L 为滑面的长度 (m); V 为后缘裂缝静水压力;

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w H^2$$

U 为沿滑面扬压力;

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w LH$$

K_f 为稳定系数。

当滑面扬压力大于滑体重时, 滑动面正压力为零, 此时滑坡抗滑力只考虑滑面的 C 值。

4.5 计算结果

滑坡稳定性计算结果见表 1。

表 1 滑坡稳定性计算结果表

计算断面 编号	工况 I 稳定性系数	工况 II 稳定性系数	工况 III 稳定性系数	滑坡推力 /kN·m ⁻¹
1-1' 剖面 1 [#] 滑面	1.82	0.99	1.19	36.77
1-1' 剖面 2 [#] 滑面	1.89	1.01	1.24	22.77
1-1' 剖面 3 [#] 滑面	1.86	1.03	1.25	17.2
2-2' 剖面 1 [#] 滑面	1.77	1.01	1.15	33.25
2-2' 剖面 2 [#] 滑面	1.82	1.04	1.18	17.65
2-2' 剖面 3 [#] 滑面	1.86	1.05	1.21	12.21
3-3' 剖面 1 [#] 滑面	1.84	1.03	1.19	32.15
3-3' 剖面 2 [#] 滑面	1.83	1.02	1.19	26.06
3-3' 剖面 3 [#] 滑面	1.90	1.04	1.25	15.99

4.6 Midas 数值模拟论证

本文通过 Midas 建立模型, 其采用的岩土体尺寸及物理力学参数均与实际滑坡一致。模拟结果如下(图 14、图 15、图 16)。

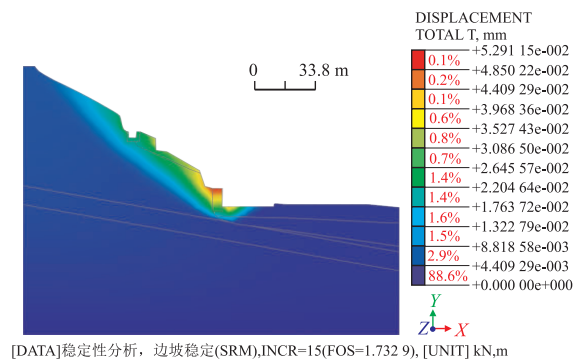


图 14 天然工况模拟结果

模拟结果表明: 天然工况下稳定性系数为 1.732 8; 暴雨工况下稳定性系数为 0.987 9; 地震工况下稳定性系数为 1.168 7, 与表 1 稳定性计算结果基本一致。

4.7 滑坡稳定性评价

由表 1 和数值模拟结果可知: 滑坡在天然工况及地震工况下处于稳定状态, 在暴雨工况下处于欠稳定状态。计算结果与滑坡的变形特征吻合。

5 主要治理措施

根据灾害体变形破坏特征及受保护对象分布情

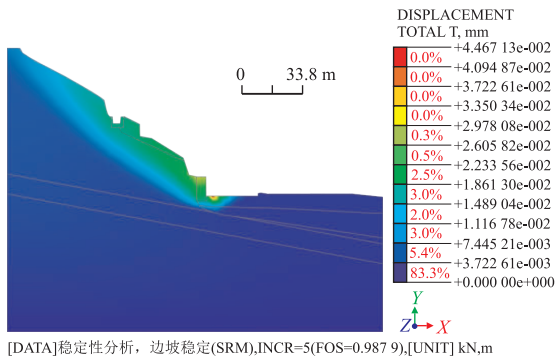


图 15 暴雨工况模拟结果

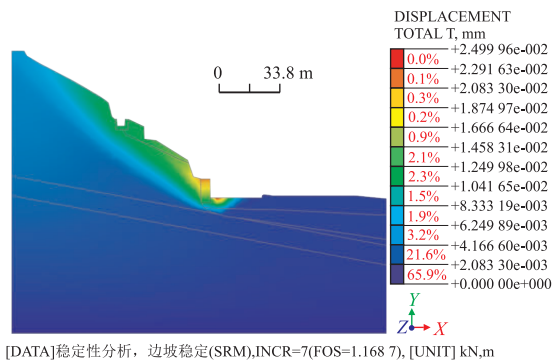


图 16 地震工况模拟结果

况,结合场镇规划,对滑坡采用改沟及弃渣回填工程+抗滑桩+拉裂缝封填。首先进行改沟及弃渣回填,再进行抗滑桩施工,主体工程在雨季之前完工,最后再对拉裂缝进行封填。施工期间应注意与场地平整的衔接,截排水工程根据现场实际进行施工。施工顺序不必拘泥一格,应视现场情况而定。

6 结论

针对普贤乡场滑坡现状的危险性,通过稳定性分析计算与 Midas 数值模拟结合的手段,得到以下结论:

(1) 极端降雨是诱发该滑坡失稳变形的最直接因素。

(2) 通过极限平衡法与 Midas 数值模拟相结合能更准确判断滑坡的变形破坏机制及潜在滑动面位置。

(3) 依据灾害体变形失稳情况,对滑坡采用改沟及弃渣回填工程+抗滑桩+拉裂缝封填,以达到防灾减灾的目的,为类似滑坡的治理提供参考。

参考文献

- [1] 黄志强,任鸿飞,胡书礼. 河南伊川瑶来滑坡形成机制及稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(2): 5-9.
- [2] 姬淑丽. 安徽省池州市新龙村明章组滑坡稳定性分析与趋势预测[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(1): 8-12.
- [3] 张林,周灵,谢腾蛟. 某大型岩质古滑坡特征及其工程治理[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 24(4): 37-41.
- [4] 杨波. 强度折减法和极限平衡法进行边坡稳定性分析的对比[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(7): 22-25.
- [5] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质评论, 2014, 60(4): 858-868.
- [6] HOSSAIN M. K. Effect of rainfall on matric suction and stability of a residual granite soil slope[J]. Dhaka University of Engineering & Technology Journal, 2010, 1(1): 37-41.
- [7] 周倩,陆剑宇,辛武,等. 湖南省永兴县五星组滑坡成因机制及稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(4): 3-8.
- [8] 李东,杨华舒,周新伟,等. 片马镇国门小学滑坡稳定性评价及治理方案研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(3): 7-12.
- [9] 肖婷,殷坤龙,杨背背. 三峡库区四方碑滑坡稳定性与变形趋势预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 10-23.
- [10] 李洪建,洪五华,史文兵. 贵州惠水鑫册滑坡变形破坏机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 19-25.
- [11] 谭福林,胡新丽,张玉明,等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 597-606.
- [12] 尹国荣,张可能. 新晃县五里牌滑坡特征及其治理建议[J]. 化工矿产地质, 2005, 27(3): 163-168.
- [13] 邹新特,刘朝晖. 湖南南岭山区公路典型路堑边坡处治研究[D]. 长沙理工大学, 2012.
- [14] 许强,彭大雷,亓星,等. 2015年“4.29”甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 167-180.
- [15] 温铭生,方志伟,王阳谷. 都江堰市五里坡特大滑坡灾害特征与致灾成因[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 448-453.
- [16] 姚应文,刘伟,方娜. 云南怒江州兰坪县地质灾害特征及防治对策[J]. 云南地质, 2019, 38(4): 483-488.
- [17] 陈刚,李世民,蔡敏. 高川陈家坡滑坡的形成机制及稳定性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 134-138.
- [18] 王在泉. 边坡动态稳定预测预报及工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, (2): 7-12.
- [19] CASAGLI N, FRODELLA W, MORELLI S, et al.. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning [J]. Geoenvironmental Disasters, 2017, 4(1): 1-23.
- [20] TOFANI V, SEGONI S, AGOSTINI A, et al.. Technical note: use of remote sensing for landslide studies in Europe [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13(2): 299-309.

作者简介: 熊毅(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事地质灾害防治研究工作。E-mail: 553453369@qq.com

通讯作者: 郭婷婷(1984—),女,博士,副教授,主要从事水文地质,地质灾害评价与减灾工程工作。E-mail: 181604785@qq.com