

贵州水城尖山营滑坡动力学特性分析与隐患点致灾范围预测

张磊, 周银朋, 庄宇, 邢爱国, 何君毅, 张彦博

Dynamic analysis and prediction of rear slope affected area of the Jianshanying landslide in Shuicheng County, Guizhou Province

ZHANG Lei, ZHOU Yinpeng, ZHUANG Yu, XING Aiguo, HE Junyi, and ZHANG Yanbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202204006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于BA-LSSVM模型的黄土滑坡致灾范围预测

Prediction of the disaster area of loess landslide based on least square support vector machine optimized by bat algorithm

吴博, 赵法锁, 贺子光, 段钊, 吴韶艳 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 1-6

金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析

Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide

黄细超, 余天彬, 王猛, 朱赛楠, 宋班, 刘文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 40-51

新疆伊宁县克孜勒赛滑坡成灾机理和动力学特征

#{suggestArticle.titleEn}

杨龙伟, 魏云杰, 朱赛楠, 王文沛, 邵海, 高杨 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 18-24

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202204006

张磊, 周银朋, 庄宇, 等. 贵州水城尖山营滑坡动力学特性分析与隐患点致灾范围预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 1-7.

ZHANG Lei, ZHOU Yinpeng, ZHUANG Yu, et al. Dynamic analysis and prediction of rear slope affected area of the Jianshanying landslide in Shuicheng County, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 1-7.

贵州水城尖山营滑坡动力学特性分析与 隐患点致灾范围预测

张磊¹, 周银朋¹, 庄宇², 邢爱国², 何君毅², 张彦博²

(1. 贵州省地矿局测绘院, 贵州 贵阳 550018;

2. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 2020年9月16日, 受地下采动和降雨影响, 贵州水城县发耳镇尖山营不稳定斜坡发生山体滑坡, 约 $80 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的岩土体倾泻而下, 在运动过程中破碎解体形成碎屑流。滑坡最大运动距离达到1 km, 最大高差约300 m。文章基于高精度无人机航测影像建立滑坡区三维数值模型, 利用DAN3D动力分析软件对尖山营滑坡-碎屑流运动全过程开展数值模拟, 分析了滑体动力学特征和堆积分布。在此基础上, 利用反演确定的数值流变模型和参数, 对尖山营不稳定斜坡潜在滑坡区开展致灾范围预测。研究成果为高位远程滑坡致灾范围预测和尖山营地区危险性评估提供了依据。

关键词: 尖山营滑坡; 动力学特性; 致灾范围预测; DAN3D

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)03-0001-07

Dynamic analysis and prediction of rear slope affected area of the Jianshanying landslide in Shuicheng County, Guizhou Province

ZHANG Lei¹, ZHOU Yinpeng¹, ZHUANG Yu², XING Aiguo², HE Junyi², ZHANG Yanbo²

(1. Institute of Surveying and Mapping Guizhou Geology and Mineral Exploration Bureau, Guiyang, Guizhou 550018, China; 2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: On September 16, 2020, the combination of mining activities and constant rainfall triggered a long runout landslide in Jianshanying area, Guizhou Province, China, causing a landslide of approximately $80 \times 10^4 \text{ m}^3$ of rock and soil to slide down and form a debris flow. The maximum movement distance of the landslide reached 1 km, with a maximum height difference of about 300 m. Many houses and two roads were destroyed, fortunately without causing casualties. In this study, detailed field investigation combined with the UAV aerial photography were conducted to obtain the geological setting and the digital elevation model of the landslide region. Subsequently, the dynamic model DAN3D was utilized to study the dynamic characteristics and deposit distribution of the Jianshanying landslide. Simulated results were found to match the actual situation well, and the Frictional-Voellmy rheology was identified as an accurate tool for simulating the long runout landslide. Based on

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-07-10

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977215); 黔科合支撑[2022]一般199; 黔地矿科合(2021)27号; 黔地矿测科合(2020)01号

第一作者: 张磊(1983-), 男, 河北邯郸人, 地图制图学与地理信息工程专业, 硕士, 正高级工程师, 主要从事3S技术在自然资源调查、生态修复以及地质灾害治理。E-mail: 250255667@qq.com

通讯作者: 周银朋(1983-), 男, 陕西富平人, 地理信息系统专业, 本科, 正高级工程师, 主要从事3S技术、无人机航测技术在自然资源调查、生态修复以及地质灾害治理方面的应用。E-mail: 272053220@qq.com

the numerical parameters determined from the inversion work, the sliding process and possible travel distance of the potential landslide were simulated. The findings from this study will be helpful aid in predicting landslide runout in high-altitude regions, particularly for the residents in the potential danger zone of the Jianshanying landslide.

Keywords: Jianshanying landslide; dynamic characteristics; landslide affected area prediction; DAN3D

0 引言

贵州岩溶山区地质环境复杂、人类活动强烈,是我国特大崩滑灾害高发区^[1-3]。特别是近年来,随着采矿活动强度增大,矿山崩滑灾害频发。据贵州省地质环境监测院资料统计,截至 2019 年,由采矿诱发的地质灾害总数达到 996 处。矿山崩滑灾害不仅监测预警难度大、体量大,而且致灾动力过程复杂,导致空间预测难度大,群死群伤性崩滑灾害不断发生。例如:2004 年 12 月 3 日,受地下采动诱发,贵州省纳雍县鬃岭镇突发崩塌灾害,约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌体倾泻而下。崩塌体受微地貌影响,于海拔 1 913 m 处产生分流,西支碎屑流摧毁了 12 栋房屋,共造成 39 人死亡和 5 人失联^[4];2017 年 8 月 28 日纳雍县张家湾镇发生高位崩塌,约 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌体自源区高位启动,沿途铲刮运动 800 m,最终形成体积约 80 万方的堆积体。碎屑流在运动过程中受一 20 m 高的小山包阻挡产生分流,摧毁了下游大树脚组和桥边组的 23 栋房屋,造成 26 人遇难,9 人失踪^[5]。因此,如何对贵州省矿山崩滑灾害潜在隐患点开展致灾范围预测,防范特大崩滑灾害造成的群死群伤事故,成为当前亟须解决的重要科学难题。

尖山营不稳定斜坡是贵州省典型的矿山崩滑灾害潜在隐患点,自 2005 年开始进行大规模采煤,截至 2019 年,开采煤层多达 8 层,坡体已发生显著变形,并于 2020 年 9 月 16 日受地下采动和降雨影响触发滑坡灾害,严重威胁到当地 279 户 1 062 名居民的生命财产安全。刘兵^[6]综合了现场调查、遥感影像分析和地表 GPS 实时监测技术,对尖山营不稳定斜坡位移和变形破坏特征进行了分析;CHEN 等^[7]通过光学遥感解译分析,探究了尖山营不稳定斜坡变形演化规律,并提出了变形失稳模式。ZHAO 等^[8]和 DONG 等^[9]通过数值仿真,分析了地下采动影响下尖山营不稳定斜坡裂隙发展和变形演化规律,探究了坡体结构对边坡稳定性的影响。可见,当前对尖山营不稳定斜坡的研究主要集中于边坡失稳机理和变形监测,针对尖山营滑坡运动过程动力学特性和潜在滑坡区致灾范围预测的研究还十分欠缺。因此,本文在现场调查的基础上,通过动力分析软件 DAN3D 反演再现了尖山营滑坡动力致灾全过程,并利

用确定的流变模型和参数,对潜在滑坡区开展了致灾范围预测,为尖山营地区地质灾害危险性评价提供了依据。

1 尖山营滑坡基本概况

1.1 地质环境条件

尖山营不稳定斜坡位于水城县发耳镇西侧,地形跌宕起伏,属于构造侵蚀而成的低中山至中低山地貌。最高处位于斜坡山顶,海拔 1 526 m,最低处位于发耳河西出口河床,海拔 949 m,最大高差达 577 m。斜坡所在区域位于水城县发耳煤矿三采区范围内,是典型的地下采动控制型崩滑灾害潜在隐患点,严重威胁到当地 279 户 1 062 名居民的生命财产安全(图 1)。



图 1 尖山营不稳定斜坡全貌

Fig. 1 Aerial view of the unstable slope at Jianshanying area

研究区出露地层由老至新分别为:二叠系上统龙潭组(P_3l)、三叠系下统飞仙关组(T_3f)和第四系松散堆积物(Qh)^[10]。

二叠系上统龙潭组(P_3l)由粉砂岩、细砂岩、泥岩和煤组成。底部 2~3 m 为铝质岩层,含大量菱铁矿结核、黄铁矿结核。厚度分布 410~430 m,主要位于研究区东部。

三叠系下统飞仙关组(T_3f)主要分布于研究区西侧,不稳定斜坡主要出露于该层。岩性上部为紫色、灰绿色相间钙质泥岩与细砂岩互层,夹薄至厚层状细砂岩;中部为泥质粉砂岩及粉砂质泥岩或细砂岩;底部见黑色斑粒,碳化植物化石。

第四系松散堆积物以残、坡积物和崩积物为主,厚度为 0~80 m,残、坡积物主要分布在同向坡及单斜谷

中,崩积物分布于陡崖脚下。

1.2 滑坡体特征

2020年9月16日,受地下采动和降雨等因素影响,尖山营不稳定斜坡触发大规模滑坡灾害,滑坡体体积约80万方,摧毁了两条公路,所幸未造成人员伤亡。滑体后缘海拔1320 m,前缘高程1020 m,相对高差300 m。滑体自源区高位启动后,沿正北向以碎屑流的形式高速向前运动,最终滑体前缘停止于范家沙坝和酒店子组,运动距离达1 km,后缘岩土体受其牵引作用影响,已出现明显下错,形成潜在滑体(图2、图3),并发育有宽大裂隙(图4)。根据尖山营滑坡-碎屑流运动特征,可将其分为滑源区和流通堆积区(图2、图3)。



图2 尖山营滑坡碎屑流全貌

Fig. 2 Overview of Jianshanying landslide-debris flow

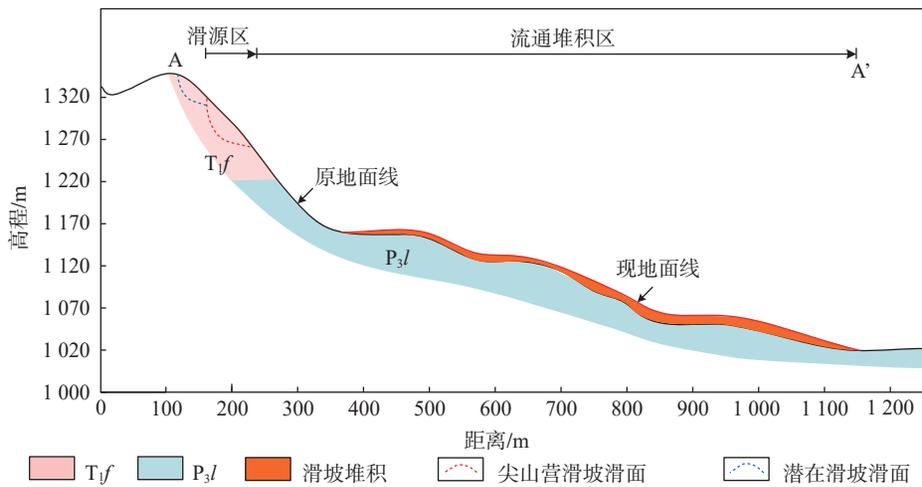


图3 尖山营滑坡剖面图(A-A'剖面)

Fig. 3 Longitudinal cross-section geological profile of the Jianshanying landslide (section A-A')



图4 坡顶宽大裂缝

Fig. 4 Aerial view of wide cracks at the top of the slope at Jianshanying area

(1) 滑源区: 位于尖山营不稳定斜坡西南侧,滑源区后缘高程为1320 m,前缘高程约1260 m,主要由第四系松散堆积和飞仙关组泥岩、砂岩组成。因长期地下采空失去有效支撑,在重力作用下产生变形,坡体裂

隙发育,为雨水快速入渗提供通道,最终在长期地下采空和降雨综合作用下发生失稳。

(2) 流通堆积区: 位于海拔1020~1260 m处。滑体失稳后,沿前缘临空方向向下运动,于海拔1160 m处受地形阻碍,发生碰撞分流。滑体主体在运动过程中不断破碎解体形成碎屑流,最终运动了约1 km,摧毁了范家沙坝和酒店子组、小寨组部分房屋,并掩埋了两条公路,未造成人员伤亡。

2 滑坡-碎屑流动力学特性分析

2.1 数值方法及计算参数

DAN3D(Dynamic Analysis)是加拿大学者HUNGR^[11]和其团队成员基于等效流体理论开发的动力分析软件,已在全球范围内高位远程滑坡动力学分析中得到了广泛应用。软件基本原理是将滑体等效为连续介质流体,通过设定不同流变关系,模拟滑坡运动速度、时间、路

径及堆积等特征。目前,大量学者已采用 DAN3D 对我国西南山区高位远程滑坡动力致灾过程进行了深入分析,研究结果表明:Frictional-Voellmy 组合模型能较好地模拟滑坡-碎屑流动力学特征^[12-16]。因此,本文在滑源区选用 Frictional 模型,流通堆积区采用考虑流体湍流项的 Voellmy 流变模型,对尖山营滑坡-碎屑流进行数值仿真,并基于反分析法系统地调整数值流变参数,直至模拟结果与实际情况基本一致。

Frictional 模型假设滑体所受剪切阻力(τ)正比于正应力(σ):

$$\tau = \sigma(1 - r_u)\tan\varphi \quad (1)$$

式中: r_u ——孔压系数,即孔隙水压力与正应力之比;

φ ——摩擦角/(°)。

Voellmy 模型将滑体所受剪切阻力视为摩擦力和湍流流动产生的阻力之和,表达式为:

$$\tau = \sigma f + \rho g v^2 / \xi \quad (2)$$

式中: f ——摩擦系数;

ρ ——滑体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

g ——重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);

v ——滑体速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

ξ ——湍流系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)。

基于高精度无人机航测影像,采用 PIX4D 及 Surfer 软件分析处理无人机航测数据,建立滑坡区数字高程模型(图 5),尖山营滑坡模型精度为 2.5 cm。在此基础上,结合现场精细调查,明确了滑坡分区和致灾范围(图 2)。以滑坡运动路径及致灾范围为参考,通过反分析法调整数值流变参数,直至数值模拟得到的滑坡运动路径和致灾范围与实际情况基本一致。本文选用的流变模型及参数如表 1 所示。

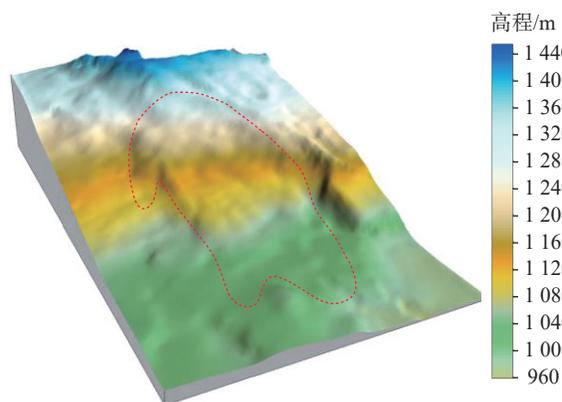


图 5 尖山营滑坡数字高程模型

Fig. 5 Digital elevation model of the Jianshanying landslide

表 1 尖山营滑坡流变模型和参数取值

Table 1 Selected rheological models and parameter values of the Jianshanying landslide

	流变模型	摩擦角	孔压系数	摩擦系数	湍流系数
滑源区	Frictional	27	0.5	—	—
流通堆积区	Voellmy	—	—	0.18	600

2.2 尖山营滑坡运动过程模拟结果

尖山营滑坡-碎屑流运动全过程的 DAN3D 模拟结果如图 6 所示。滑坡-碎屑流最大运动距离约 1 km,运动时间持续约 50 s,随后只有少量的内部蠕变和侧向变形,滑坡已基本停止运动。碎屑流最终堆积厚度为 0~15 m,几乎覆盖整个堆积区,最大堆积厚度位于滑体左侧前缘,滑坡运动距离和堆积形态与实际情况较为吻合。

滑坡启动后,受地形影响沿正北方向运动并不断加速,20 s 时滑体已全部离源区。受海拔 1 160 m 处山脊影响,少量滑体分流,滑坡主体仍沿主滑方向向前运动。40 s 时,滑体前缘抵达范家沙坝和酒店子组公路,阻断公路正常运行。最终至 50 s 时,滑体前缘抵达小寨组并基本停止运动,堆积形态不再发生改变。

尖山营滑坡-碎屑流速度分布如图 7 所示。研究区地形地貌呈现典型的“上陡下缓”特征,滑源区海拔较高,坡度较陡,滑坡启动后,巨大的势能转化为动能,在 10 s 时,前缘速度达到峰值,约 36 m/s,随后,滑体仍保持 25 m/s 的高速向前运动。20 s 后,滑体前缘运动至海拔 1 100 m 处,受地形变缓影响开始减速,直至运动停止。

3 潜在隐患点致灾范围预测

尖山营滑坡发生后,后缘岩土体受其牵引作用影响,已出现明显下错,形成潜在滑体。如图 2 所示,潜在滑坡区面积约 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,呈三角形分布,结合三维数字高程模型分析和现场精细调查,预估体积约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。潜在滑坡区后缘已明显下错形成宽大裂隙,前缘为凌空面,在后续降雨和自身重力作用下极易失稳,形成高位远程滑坡灾害。因此,亟须对其开展致灾范围预测,预测其可能的影响范围,为尖山营地区人居安全和居民搬迁提供依据。

由于潜在滑坡与 2020 年已发生滑坡具有相似的工程地质条件,因此本文利用尖山营滑坡数值反演结果已确定的流变模型及参数,对潜在滑坡区致灾范围进行预测,尖山营不稳定斜坡潜在滑体动力致灾过程的数值模拟结果如图 8 所示。潜在滑体的运动时间为 60 s,

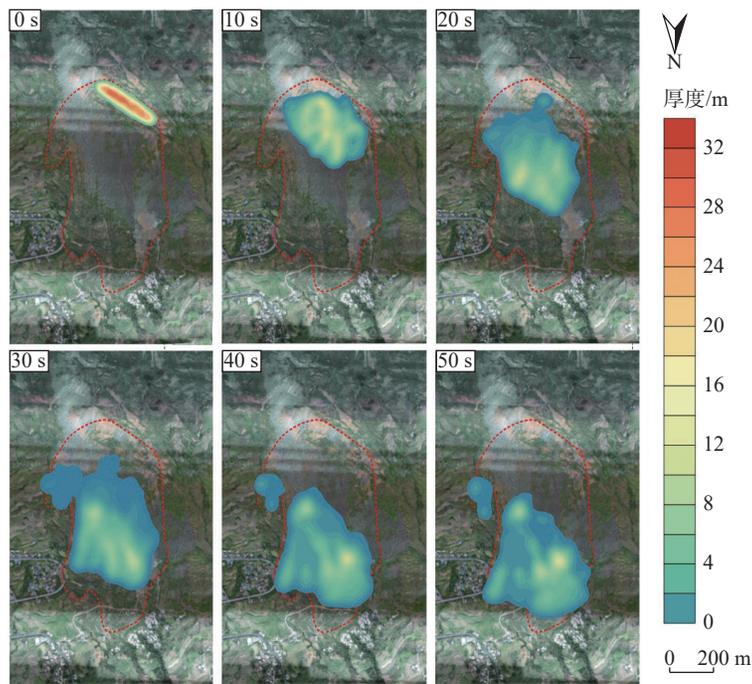


图 6 尖山营滑坡-碎屑流运动过程不同时刻滑体堆积形态

Fig. 6 Landslide accumulation distribution patterns for landslide-debris flow deposits of the Jianshanying landslide at different moments

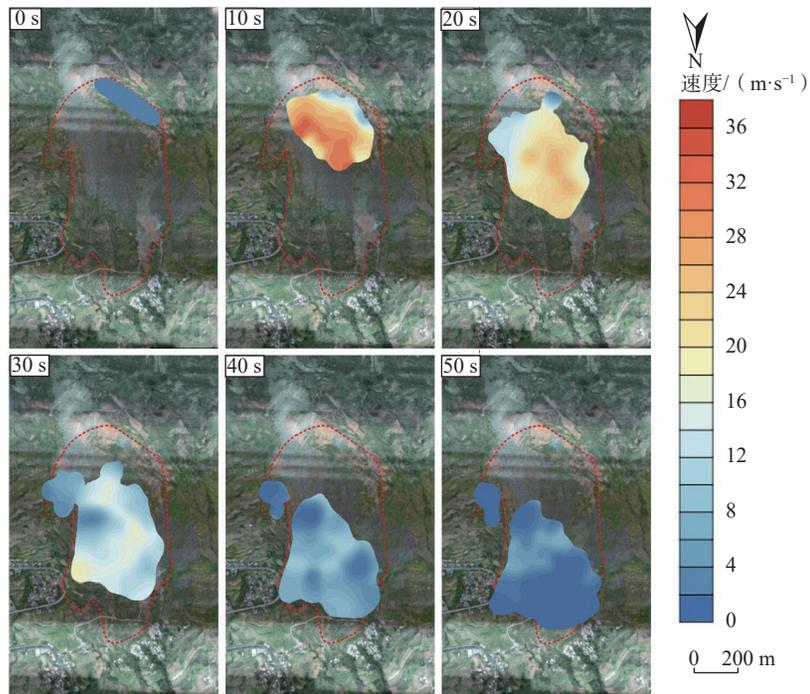


图 7 尖山营滑坡-碎屑流运动过程不同时刻速度分布云图

Fig. 7 Cloud map of velocity distribution of the landslide-debris flow movement in the Jianshanying landslide at different moments

滑体运动距离同样达到了约 1 km。滑体高位启动后,沿 15°方向高速运动并随后逐渐转为正北向运动。与 2020 年 9 月 16 日发生的高位滑坡运动过程相似,潜在滑体在运动中于海拔 1 160 m 处受山脊阻碍产生分流,滑坡主体仍沿正北向运动,最终覆盖于已发生滑坡堆积

体上。潜在滑坡堆积厚度为 0 ~ 11 m,滑体将再次淹没新修公路,并摧毁酒店子组部分房屋,造成可能的人员伤亡和财产损失。因此,亟须对当地居民进行适当搬迁,并进行地质灾害安全教育,防范群死群伤性滑坡灾害的发生。

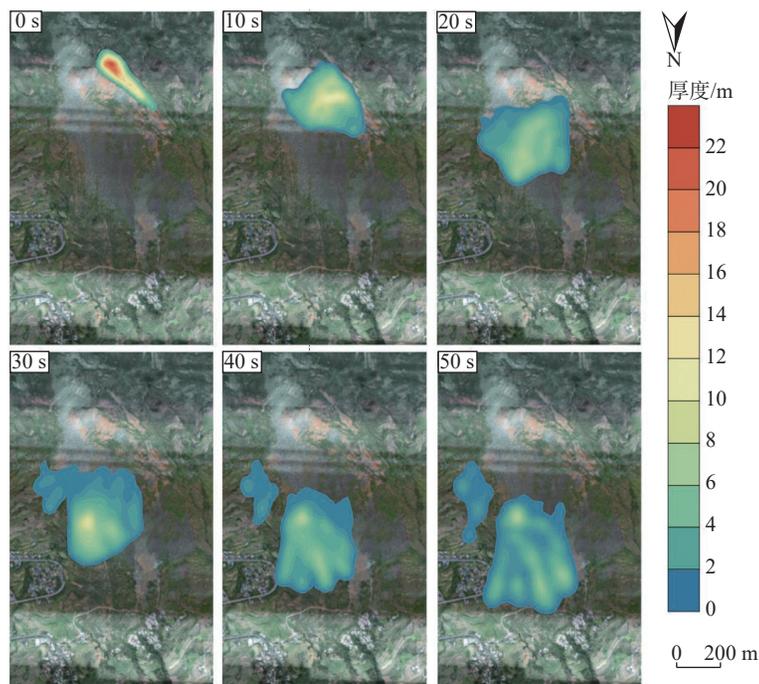


图 8 尖山营潜在滑坡致灾范围预测

Fig. 8 Prediction of affected area of the potential landslide at Jianshanying area

4 结论

针对 2020 年 9 月 16 日贵州尖山营不稳定斜坡发生的高位远程滑坡灾害,本文基于现场精细调查和高精度无人机航测影像建立了滑坡区三维数字高程模型,利用动力分析软件 DAN3D 分析了其致灾过程和动力学特性,并在此基础上对潜在滑坡区进行了致灾范围预测,得到如下结论:

(1) 基于动力分析软件 DAN3D,采用 Frictional-Voellmy 组合模型模拟了尖山营滑坡动力致灾全过程。结果表明:尖山营滑坡-碎屑流运动时长约 50 s,最终堆积厚度为 0~15 m,滑坡最大速度达到 36 m/s,模拟的滑坡运动距离、堆积范围和方量与实际情况较为吻合。

(2) 基于数值反演确定的流变模型和参数对潜在滑坡开展致灾范围预测,潜在滑坡区预估体积约 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$,模拟结果表明:潜在滑体运动距离可达 1 km,将再次淹没新修公路,并摧毁酒店子组部分房屋。因此需对当地居民进行搬迁,避免人员伤亡和不必要的财产损失。

参考文献(References):

[1] 李滨,殷跃平,高杨,等.西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J].水文地质工程地质,2020,47(4): 5-13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest

China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 5-13. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 贺凯,李滨,赵超英,等.基于易滑地质结构与多源数据差异的岩溶山区大型崩滑灾害识别研究[J].中国岩溶,2020,39(4): 467-477. [HE Kai, LI Bin, ZHAO Chaoying, et al. Identification of large-scale landslide hazards based on differences of geological structure prone to sliding and multiple-source data in karst mountainous areas [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 467-477. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王琦,胡亚净,宋伟利,等.岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测——以贵州松桃县长冲危岩体为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(1): 75-84. [WANG Qi, HU Yajing, SONG Weili, et al. Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴彩燕,乔建平,王成华,等.贵州省纳雍县鬃岭镇“12·3”大型崩塌灾害分析[J].水土保持研究,2006,13(6): 100-102. [WU Caiyan, QIAO Jianping, WANG Chenghua, et al. Analysis on “12·3” super large-scaled landslide in zongling, Nayong, Guizhou [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 100-102. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ZHU Yaoqiang, XU Shimin, ZHUANG Yu, et al. Analysis of characteristics and runout behaviour of the disastrous 28 August

- 2017 rock avalanche in Nayong, Guizhou, China [J]. *Engineering Geology*, 2019, 259(3): 105154.
- [6] 刘兵. 贵州尖山营滑坡变形监测分析与滑动机理研究 [J]. *中国水运*, 2021, 21(4): 109–110. [LIU Bing. Deformation monitoring analysis and sliding mechanism research of Jianshanying landslide in Guizhou Province [J]. *China Water Transport*, 2021, 21(4): 109–110. (in Chinese with English abstract)]
- [7] CHEN Liqun, ZHAO Chaoying, LI Bin, et al. Deformation monitoring and failure mode research of mining-induced Jianshanying landslide in karst mountain area, China with ALOS/PALSAR-2 images [J]. *Landslides*, 2021, 18(8): 2739–2750.
- [8] ZHAO Jianjun, XUN Wan, SHI Yanbing, et al. Deformation behavior of mining beneath flat and sloping terrains in mountainous areas [J]. *Geofluids*, 2021, 2021(8): 1–16.
- [9] DONG Jianhui, LI Haijun, WANG Yangshuang, et al. Characteristics and monitoring-based analysis on deformation mechanism of Jianshanying landslide, Guizhou Province, southwestern China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(3): 184.
- [10] 朱要强. 贵州岩溶山区特大崩(滑)-碎屑流致灾机理研究 [D]. 成都: 成都理工大学. [ZHU Yaoqiang. Study on the mechanism of catastrophic collapse (slip)-debris flow in Guizhou karst mountain area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)]
- [11] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 610–623.
- [12] 康孟羽, 朱月琴, 陈晨, 等. 基于多元非线性回归和BP神经网络的滑坡滑动距离预测模型研究 [J]. *地质通报*, 2022, 41(12): 2281–2289. [KANG Mengyu, ZHU Yueqin, CHEN Chen, et al. Study on landslide sliding distance prediction model based on multivariate nonlinear regression and BP neural network [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2281–2289. (in Chinese with English abstract)]
- [13] XING Aiguo. Dynamic analysis and field investigation of a fluidized landslide in Guanling, Guizhou, China [J]. *Engineering Geology*, 2014, 181: 1–14.
- [14] XING Aiguo, YUAN Xiaoyi, XU Qiang, et al. Characteristics and numerical runout modelling of a catastrophic rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake in the Wenjia valley, Mianzhu, Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2017, 14(1): 83–98.
- [15] ZHUANG Yu, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Combined numerical investigation of the Yigong rock slide-debris avalanche and subsequent dam-break flood propagation in Tibet, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(9): 2217–2229.
- [16] ZHUANG Yu, XING Aiguo, CHENG Qiangong, et al. Characteristics and numerical modeling of a catastrophic loess flow slide triggered by the 2013 Minxian-Zhangxian earthquake in Yongguang Village, Minxian, Gansu, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(1): 439–449.