引用格式:朱怡飞,姚鑫,姚磊华,等,2022. 基于 InSAR 和光学遥感的贵州鬃岭采煤滑坡识别与危险性评价 [J]. 地质力学学报,28 (2):268-280. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021054

Citation: ZHU Y F, YAO X, YAO L H, et al., 2022. Identification and risk assessment of coal mining-induced landslides in Guizhou Province by InSAR and optical remote sensing [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 268-280. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021054

基于 InSAR 和光学遥感的贵州鬃岭采煤滑坡识别与危险性 评价

朱怡飞^{1,2,3,4},姚 鑫^{1,2,3,},姚磊华⁴,周振凯^{1,2,3,4},姚闯闯^{1,2,3},肖诗豪⁵ ZHU Yifei^{1,2,3,4}, YAO Xin^{1,2,3}, YAO Leihua⁴, ZHOU Zhenkai^{1,2,3,4}, YAO Chuangchuang^{1,2,3}, XIAO Shihao⁵

- 1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
- 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室,北京 100081;
- 3. 中国地质调查局新构造运动方向与地壳稳定性研究中心,北京 100081;
- 4. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;
- 5. 贵州大学 土木工程学院,贵州 贵阳 550000
- 1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
- 3. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;
- 4. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
- 5. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, Guizhou, China

Identification and risk assessment of coal mining-induced landslides in Guizhou Province by InSAR and optical remote sensing

Abstract: The Zongling landslide group in Guizhou Province is characterized by strong regularity of disaster formation, concentrated development and severe threat. It is represented in the coal mining-induced geological hazards in western Guizhou and eastern Yunnan. In this paper, InSAR and optical remote sensing were used for nuanced identification to obtain the regional landslide information, and the landslide deformation-failure mode in the Zongling region was summarized. Based on this, the volume-distance statistical formula suitable for landslide risk assessment in this region was established, and the typical disaster bodies ware calculated. Some important insights are gained: Underground coal mining is the major contributor to the deformation of the edge of Table Mountain in Zongling. InSAR observation results show that the deformation in the Zongling area has prominent zonal characteristics, and the annual average deformation velocity is between $-20.4 \sim 10.2$ cm/a, which corresponds well with the lower goaf. The areas with great displacement are concentrated in the edge zone of cuesta, with coal mining subsidence and slope gravity superimposed; There are 64 deformations in the Zongling area, including 37 landslides, 27 cracks, and 2 dangerous deformed bodies. Landslides mainly occur in the dark grey limestone strata and dark purplish-red argillaceous siltstone strata of the Feixianguan Formation. According to the lithology and deformation characteristics of the slip source, the landslides can be classified into two types: pull-toppling and pullclipping, and the former is distinguished by large particle size, long movement distance, and severe threat. The formula for calculating the slip distance of rock landslide debris flow has good applicability to the slip distance of

基金项目: 三峡集团公司项目 YMJ (XLD) /(19) 110; 中国地质调查局工作项目 (DD20221738-2)

This research is financially supported by China Three Gorges Corporation Project (Grant No. YMJ (XLD) /(19) 110) and the Chinese Geological Survey Project (Grant No. DD20221738-2)

第一作者简介:朱怡飞 (1995—),男,在读博士,主要从事 InSAR 与地质灾害研究。E-mail: zhuyifeicugb@163.com 通讯作者:姚鑫 (1978—),男,博士,研究员,从事地质灾害与 InSAR 研究。E-mail: yaoxingphd@163.com 收稿日期: 2021-05-29;修回日期: 2021-09-17;责任编辑:吴芳

coal mining-induced landslide developed in the "upper hard and lower soft" strata in the Zongling area, and the

verification error is less than 5%. The formula is used to calculate the dangerous deformed bodies of Zuojiaying and Jingjiao in the study area, and the danger avoidance distance is predicted to be 220~386 m. The proposed method of coal mining-induced landslide risk assessment based on differential interferometry and optical image play an exemplary role for the prevention and control of coal mining-induced landslides in western Guizhou and eastern Yunnan.

Key words: Zongling landslide group; optical remote sensing; InSAR; landslide slip distance; risk assessment

摘 要:贵州鬃岭滑坡群具有孕灾规律性强、发育集中密集、威胁严重等特点。文章利用 InSAR 和光学 遥感进行精细识别,获取了区域滑坡灾害信息,总结了鬃岭区域滑坡变形破坏模式,基于此建立了该地 区的滑坡风险评价的体积-距离统计公式,并对典型灾害体进行了计算,获得了一些重要认识。地下采煤 活动是引起鬃岭桌山边缘山体变形的主要原因; InSAR 观测结果显示鬃岭地区变形具有明显的带状特征, 年平均变形速度为-20.4~10.2 cm/a,与下部采空区具有较好的对应关系,大位移区域集中在采煤沉降和 斜坡重力叠加的桌山边缘地带; 鬃岭地区现存变形现象 64 处,其中滑坡 37 处,裂缝 27 条,危险变形体 2 处;滑坡主要发生在飞仙关组深灰色灰岩岩层和暗紫红色泥质粉砂岩岩层中,根据滑源岩性及变形特征 将滑坡划分为拉裂-倾倒和拉裂-剪断两种类型,其中拉裂-倾倒型滑坡堆积体粒径大,运动距离远,威胁 较大;文中建立的岩质滑坡碎屑流滑移距离计算公式,对鬃岭地区上硬下软地层中发育的采煤滑坡滑移 距离具有良好的适用性,验证误差在 5%以内,利用该公式对鬃岭滑坡群左家营和箐脚危险变形体进行计 算,预测危险避让距离在 220~386 m。文章提出的基于差分干涉测量技术和光学影像的采煤滑坡危险性评 价方法对黔西、滇东地区的采矿滑坡防治工作具有重要的示范意义。

关键词: 鬃岭滑坡群; 光学遥感; InSAR; 滑坡运移距离; 危险性评价

中图分类号: P694; P642.22 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2022) 02-0268-13 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021054

0 引言

人类活动正在逐渐替代自然营力成为影响斜 坡稳定性的主要原因(黄润秋,2007)。矿山开 采,水电开发,修路切坡等人类工程活动引发的 崩滑地质灾害事件发生频率逐渐增加,造成的人 员死亡及财产损失情况日益严重。近年来,我国 西部多次发生采矿引发的重大地质灾害事件,2009 年重庆武隆鸡尾山崩滑造成77人死亡;2013年贵 州渔洞村滑坡造成5人失踪,2017年贵州纳雍普 洒崩滑造成26人死亡。通过对以往大型崩滑灾害 研究发现,从变形开始到最终失稳破坏,地质体 经历了长期复杂演变过程,而对地质体的地表变 形演化和破坏痕迹发展进行定量分析则对崩滑灾 害的稳定性分析具有指导作用(Zhang et al., 2019; Fan et al., 2019; 李为乐等, 2019)。

光学遥感识别和合成孔径雷达差分干涉测量 技术是进行地质灾害调查的可靠手段(刘星洪等, 2018;韩冬建等,2020; Wang et al.,2020)。利用 光学遥感提取的裂缝、陡坎、前缘隆起和塌陷等 变形标志可对已经发生过整体失稳或存在显著变 形特征的滑坡进行快速识别(刘桂卫等,2019;陆 会燕等,2019)。遥感图像低分辨率和西南地区云 雾遮蔽等缺陷,都对光学遥感识别滑坡带来挑战。 合成孔径雷达差分干涉测量(InSAR)技术通过计 算同一地区不同时刻的 SAR 影像相位差,获取时 间间隔内的精确变形信息,可以对不稳定地质体 的活动边界及变形速率进行有效探测。InSAR 在滑 坡调查和位移监测领域突出优势得到了研究人员 的广泛认同(李凌婧等,2014;朱建军等,2017; 李振洪等,2019)。2017 年四川省新磨滑坡发生以 来,国内外研究人员利用时间序列 InSAR 方法获 取了新磨滑坡失稳破坏前有效的加速变形信息, 为滑坡稳定性监测提供了新的思路与方案(Dong et al.,2018)。

鬃岭变形带变形时间长,变形范围大,茂盛 的植被条件和高陡的山势给地质灾害调查工作带 来了极大的挑战。目前鬃岭滑坡群仅进行了简要 的地质调查和单体崩滑的描述工作,而针对鬃岭 滑坡群滑坡变形模式、危岩体分布和稳定性情况 尚未进行深入研究。文章以鬃岭滑坡群为研究区, 提出了一套基于差分干涉测量技术和光学影像的 采煤滑坡危险性评价方法。以 8 期 PALSAR-2 数据 的 D-InSAR 计算结果为基础,综合 12 期多源多时 相光学影像和无人机航摄照片对鬃岭滑坡群潜在 变形体进行定量识别:然后利用地质地形资料对 滑坡机制进行了分析:最后采用体积-距离模型对 变形体滑移距离进行计算,实现了对变形体危险 性评价。该研究为黔西地区采矿滑坡危险性评价 探索了新的方法,并对黔西、滇东地区的采矿滑 坡防治工作具有重要的示范意义。

鬃岭滑坡群概况 1

104°30'E

赫章县

PALSAR-2 数据范围

水城县

135°

 $P_{2}l+c+d$

27°17'N

26°46'N

15'N

26°1

高程/m

2200

2000

1800

1600

1400

鬃岭滑坡群地处贵州省毕节市,距离纳雍县 城 13 km,海拔 1600~2400 m (图 1a)。 鬃岭滑坡

105°0'E

105°30'E

纳雍县

大方县

毕节市

髻岭滑坡群

六枝特区

桌山边缘高陡变形带 山前平台

 P_2l

106°0'E

黔西县

织金县

普定县

50km

25

a

群地势上处于青藏高原第一阶梯与东部丘陵平原 第三阶梯过渡的斜坡地带,大地构造单元属扬子 准地台黔北台隆遵义断拱毕节北东向构造变形区 (杨秀忠和薛立根, 1994)。区内主要出露地层为 二叠系上统龙潭组 (P,l)、长兴组 (P,c) 和大隆 组 (P,d), 三叠系下统飞仙关组 (T,f)、永宁镇 组(T₁yn)及第四系(图1b)。龙潭组为区内主要 的含煤地层,由泥质粉砂岩、泥灰岩、玄武岩 (P₃β)及煤层组成。其含可采煤层 11 层,主要分 布在上段。下段主要岩性为火山角砾岩与深灰色 玄武岩,不含可采煤层。长兴组和大隆组主要岩 性为燧石灰岩与泥质粉砂岩。上部为三叠系下统 飞仙关组 (T₁f), 其中飞仙关组第一段及第三段, 岩性以泥质粉砂岩夹薄层泥灰岩为主, 岩体物理 力学性质较差。飞仙关组第二段,岩性以灰岩为 105°10'E 105°12'E 105°14'E 105°16'E 105°18'E

Т.

 P_{l+c+d}



影岭滑坡群位置及 PALSAR-2 数据覆盖范围: b—鬃岭滑坡群地质图: c—A-A,横截剖面图

鬃岭滑坡群概况 图 1

Fig. 1 General situation of the Zongling landslide group

(a) Location of the Zongling landslide group and the coverage of PALSAR-2 images; (b) Geological map; (c) Geological profile of A - A'

26°46'N

26°44'N

26°42'N

1高程/m A'

> 2200 2000

1800

1600

1400

1200 с

2km

 $T_{i}f$

5500 水平距离/m

断层线

 $P_{2}l+c+d$

主,工程力学性质较好。整体上看,鬃岭滑坡群 地层力学性质由上至下表现为上硬下软的特征。 地层总体走向为南西—北东向,倾角 10°~55°。 鬃岭滑坡群地质图和典型剖面见图 1c,鬃岭滑坡 群内发育有与地层走向基本一致的高陡变形带, 落差 100~300 m,坡度约为 60°~80°。当地煤炭 资源丰富,自 2000 年以来,先后有近十家煤矿 在鬃岭山脚进行煤矿开采活动,其采区位于桌山 边缘下部地层。缓倾层状岩体的坡脚开挖及山体 长时间重复采动导致崩滑带后缘有较多深大裂缝 存在。

2 研究方法及数据

此次研究首先利用无人机航摄照片对变形体裂 缝、滑坡边界和变形特征进行提取,并根据多时相 存档光学数据(Planet 光学影像和 Google Earth 光学 影像)获取变形体动态变化情况;其次利用 D-InSAR 和 Stacking-InSAR 结果定量获取鬃岭滑坡群 变形区域及年平均变形量信息;最后综合上述信息, 结合地貌、地质数据,采用滑坡-距离模型对不稳定 斜坡进行危险性评价,研究流程见图 2。



图 2 研究流程图

Fig. 2 Research flow chart

2.1 使用数据

选用 2017 年 5 月至 2018 年 8 月拍摄的 8 期升 轨 PALSAR-2 图像计算 鬃岭地区变形。其方位向 (Azimuth) 和距离向(Range)像元大小分别为 1.43 m 和 2.21 m, 入射角为 39.2893°, 方位角为 347.78°, 其覆盖范围如图 1a 所示。选用 12 m 分 辨率 WorldDEM 数据计算地形相位和阴影面积。

以 2019 年 10 月 30 日获取的 1 期面积为 14 km² 的无人机航摄照片、2016 年 10 月至 2019 年 11 月时间间隔 6 个月的 8 期 Planet 光学影像、 2017 年 5 月至 2018 年 4 月的 3 期 Google earth 光学 影像和 2011 年获取的 12 m 分辨率的 WorldDEM 数 据作为光学解译的基础文件。其中无人机航空摄 影获取的鬃岭地区 0.1 m 高精度光学照片和地形数 据用于崩滑边界,裂缝等地质灾害精确解译; 3 m 分辨率 Planet 光学影像数据和 0.61 m 分辨率 Google earth 光学影像用于追溯现有灾害体动态变 化;数字地表模型用于生成地形阴影图,辅助光 学解译。所使用的光学遥感数据图像清晰,几何 畸变小,没有明显的云雾遮盖,能够满足灾害解 译要求。此次研究使用的光学和雷达数据参数见 表1。

2.2 光学影像解译方法

鬃岭滑坡群内已发生多起失稳破坏现象,主 要表现为岩质滑坡-碎屑流,根据鬃岭滑坡群特点 和灾害特征建立解译标志(卓宝熙,2011)。鬃岭 滑坡群由北向南可分为桌山边缘、高陡变形带和 山前平台(图1c)。

桌山边缘植被茂盛,主要发育与滑坡后缘边 界展布方向一致的拉张裂缝。拉张裂缝识别标志

Table 1 Optical and radar data sets used in the study

数据	数量	分辨率/m	采集时间	用途
PALSAR-2	8	1.43×2.21 (Az×Rg)	2017-05 至 2018-08	InSAR 数据处理
Planet 光学影像	8	3	2016-10 至 2019-11	动态解译
Google Earth 光学影像	3	0. 61	2017-05 至 2018-04	动态解译
无人机航摄照片	1	0.1	2019-11-01	精细化解译
航摄数字地表模型	1	0. 1	2019-11-01	精细化解译
WorldDEM	1	12	2011	InSAR 数据处理

是明显的线状展布特征,部分区域有明显错落陡 坎发育;滑源主要分布在高陡变形带区域,其主 要特征是顶部存在明显的滑坡后壁,大部分为裸 露的基岩,部分区域两侧存在小规模崩塌;滑坡 堆积区主要分布在山前平台区域,堆积体岩性为 灰岩,形态呈扇形或漏斗形。根据以上解译标志, 对鬃岭滑坡群内灾害进行精细化解译。在利用多 时相数据进行解译时,通过不同时相的遥感图像 的波谱及空间差异特征获取变形体动态变形过程。

由于不同平台获取的光学遥感图片在位置上 存在偏移,为了获得准确的动态解译结果,以 0.1 m分辨率的无人机航摄照片为基准,通过典型的地 物标志(山顶凸起,建筑物,道路拐角)生成配 准表,对 Google Earth 和 Planet 光学影像进行几何 矫正,获得精确配准的多源遥感数据集。

2.3 InSAR 数据处理方法

Stacking-InSAR 方法是将多幅解缠后的差分干 涉相位进行加权平均、通过最大程度地减少大气 误差、噪声相位和 DEM 误差提高形变精度的一种 方法。区别于传统 D-InSAR,在获取多幅解缠后的 差分干涉图之后,Stacking-InSAR 通过相位叠加得 到叠加时间基线内的平均形变量。其基本假设是 每一幅干涉图的大气扰动是随机的,区域上的形变 是线性的 (Strozzi et al., 2000;范景辉等, 2008; 张洋等, 2016)。

为对鬃岭地区潜在活动性滑坡范围进行识别 并获取年平均变形值,利用 Stacking-InSAR 方法对 鬃岭滑坡群变形进行计算。此次提出了一种基于 短基线策略的 Stacking-InSAR 处理方法,其处理流 程如下。

(1)首先,将覆盖鬃岭滑坡群的多幅图像配 准到选取的主影像成像空间上,结合 InSAR 数据 波段特征设置时间和空间阈值调整干涉组合,生 成差分干涉图。

(2) 其次,利用自适应滤波算法降低相位噪 声并利用地形信息和 SAR 数据入射角生成阴影叠 掩图用于干涉图对干涉数据进行掩膜,剔除可能 出现的解缠误差项。

(3)最后,对多幅差分干涉相位进行叠加, 获取叠加时间基线内的相位信息,并将相位信息 转换为变形量数值。

上述 Stacking-InSAR 流程通过对所获取影像时 间和空间基线进行优化组合,利用时间基线和空 间基线较短的差分干涉,保证了每幅干涉图的高 相干性,克服了传统 D-InSAR 技术中的时空基线 过长引起的去相关问题,优化后数据处理方法获 取的形变量数据更加准确。

3 滑坡识别与变形模式分析

3.1 光学遥感解译结果

利用 2017 年至 2019 年 12 期多源多时相光学 影像对鬃岭滑坡群进行解译,共识别出变形现象 64 处。其中滑坡 37 处,裂缝 27 条,主要沿鬃岭 桌山边缘展布(图 3)。区内滑坡以岩质滑坡碎屑 流为主,裂缝主要分布在箐脚(L18)滑坡和新房 子 2#(L27)滑坡处,展布方向与滑坡后缘展布方 向基本一致,为后缘拉裂缝。在东侧变形区崩滑 体内部有少量裂缝发育,这一结果与野外调查结 果一致。

3.2 InSAR 观测结果

以 2017 年 11 月 24 日数据为主影像对数据进 行配准。设置时间阈值和垂直基线阈值分别为 200 d 和 500 m,共产生 15 个干涉组合。利用空间 滤波对随机大气进行减弱;通过高程与层流大气 之间的相关性建立了模型,对分层大气误差进行 了修正;并利用解缠后的差分干涉相位对轨道误 差进行纠正。解缠参考点选择鬃岭滑坡群东南侧 的稳定居民区(图 3)。设置最小连续变形叠加期 数为 12 期,获取干涉时段平均变形量。

基于 8 期 PALSAR-2 数据获得了 2017 年 5 月至 2018 年 8 月鬃岭地区多时段地表变形信息(图 4)。



图 3 鬃岭滑坡群光学解译滑坡灾害分布图

Fig. 3 Optical interpretation of the landslide distribution in the study area



a-2017年5月14日至2017年6月11日干涉图; b-2017年6月11日至2017年8月6日干涉图; c-2017年8月6日至2017年11月12日 干涉图; d-2017年11月12日至2017年12月24日干涉图; e-2017年12月24日至2017年4月15日干涉图; f-2017年4月15日至2018 年7月8日干涉图

图 4 鬃岭滑坡群多时段 D-InSAR 地表变形图

Fig. 4 Multi-period surface deformation of the Zongling landslide group derived from D-InSAR

(a) Interferogram from 14 May 2017 to 11 June 2017; (b) Interferogram from 11 June 2017 to 6 August 2017; (c) Interferogram from 6 August 2017 to 12 November 2017; (d) Interferogram from 12 November 2017 to 24 December 2017; (e) Interferogram from 24 December 2017 to 15 April 2017; (f) Interferogram from 15 April 2017 to 8 July 2018

鬃岭地区变形具有明显的带状特征,沿山体走向 展布。2017年5月14日至2017年6月11日干涉 图(图4a)显示鬃岭滑坡群东西侧和中部存在明 显变形迹象。变形区域在2017年6月11日至2017 年11月12日期间明显扩大(图4b、4c),在2017 年11月11日至2017年12月24日短暂收缩(图 4d),并在2017年12月24日至2018年4月15日 继续扩大(图4e),随后不断减小(图4f)。条带 状变形区走向与地下煤系地层走向一致。

多期干涉图像中均观察到以同心圆环向外拓 展的红黄色交替干涉图斑,表明图斑中心发生变 形大于一个周期的位移量(图4)。其变形特点为 中部变形大,四周变形小,是采煤地区塌陷漏斗 的图斑特征。野外调查走访得知,中部变形区对 应左家营煤矿及光华煤矿采空区,西部变形区为 中岭煤矿及月亮湾采空区,东侧为富源煤矿采空 区,变形区域在空间上与采空区具有很好的对应 性,因此鬃岭滑坡群变形的主要原因是下部采煤 活动。

3.3 综合解译结果

通过 Stacking-InSAR 计算获得了鬃岭滑坡群 年平均变形速率(图5)。其变形量为星载雷达视 线向(LOS)变形,其中正值变形表示靠近雷达 视线向方向的变形,负值变形表示雷达视线向的 变形。鬃岭区域山体年平均变形速度为-20.4~ 10.2 cm/a,位移量最大的区域集中在桌山边缘和 高陡变形带山脚部分。桌山边缘和山前平台部分 呈现出不同的变形规律,上部山体主要为远离视 线方向变形,投影到水平向后表现为竖直向下的 运动。



滑坡边界为光学解译结果;变形速率色带显示为 InSAR 计算结果

图 5 鬃岭滑坡群年均变形速率图

Fig. 5 Average annual deformation rate of the Zongling landslide group

The landslide boundary is the result of optical interpretation. The deformation rate ribbon shows the results calculated by InSAR

利用 Stacking-InSAR 计算结果对桌山边缘的快 速变形区进行提取,快速变形区与已发滑坡重叠 度较高(图5)。鬃岭滑坡群滑坡类型为岩质滑坡 碎屑流,滑源岩体陡峭,受裂缝切割严重,堆积 区为第四纪土体及碎石。结合光学影像及野外踏 勘对危险范围进行划分(图5)。

光学解译结果与 InSAR 结果对比发现,区内 滑坡存在不同程度的变形(图5)。其中鬃岭滑坡 群中部滑坡变形程度最大,多处滑坡滑源位置存 在持续性变形;西侧区域滑坡体存在少量变形, 东侧变形区基本稳定,没有发生进一步的变形。 受采煤和高陡临空面的影响,鬃岭滑坡群内飞仙 关组灰岩和砂岩岩组最易发育活动性滑坡,将满 足条件:①发育在飞仙关组灰岩和砂岩中;②坡 度大于 40°;③InSAR 变形速率大于 6 cm/a 的斜坡 划定为危险变形体。

3.4 滑坡变形模式

鬃岭滑坡群靠近加戛背斜核部,加之东北向断 层的作用,应力集中明显(程宇等,2019)。其地层 易于发生拉张作用,并在岩体内部产生大量尺寸较 小的竖向和近水平向裂缝(Zheng et al.,2015)。高 陡变形带下部有长时间大范围采矿活动,巷道顶板 上部岩体压缩变形,边坡发生应力调整,采煤巷道 顶板及桌山边缘产生拉裂缝(赵建军等,2016)。随 着裂缝的不断发展,山体顶部裂缝向内拓展与岩体 内部缓倾裂缝贯通,在外力作用下山体逐渐发生失 稳破坏(杨忠平等,2020)。根据光学解译和现场调 查结果统计分析,按照滑源物质及斜坡变形特征将 鬃岭滑坡群内滑坡变形模式划分为拉裂-倾倒型和拉 裂-剪断两种类型。

拉裂-倾倒型滑坡主要发生在飞仙关组灰岩岩 层中,其失稳变形主要由靠近高陡凌空的一组陡 倾裂缝和一组缓倾裂缝控制(图 6a)。采空区重复 开采对上部岩层扰动增加,山顶裂缝向岩体内部 拓展,切割灰岩岩体。随着裂缝不断延伸,裂缝 宽度增加,形成良好的进水通道,最终导致危岩 体向凌空面倾倒破坏(图6b、6c)。其主要特征是 ①控制性裂缝发育在灰岩岩层中;②裂缝陡倾, 靠近高陡凌空面且贯穿岩体较深,该类型滑坡堆 积体最大粒径一般超过8m;③等效摩擦系数(*H*/ *L*)为0.3~0.4,灾害的影响范围较大,典型实例 为大土寨滑坡(L7)和中岭滑坡(L36)。



a-裂缝发育; b-危岩体形成; c-失稳破坏

图 6 拉裂-倾倒型变形模式图

Fig. 6 Deformation pattern of pull-toppling landslide

(a) Fracture development; (b) Formation of dangerous rock mass; (c) Slope failure

拉裂-剪断型滑坡主要发生在飞仙关组泥质粉砂岩岩层中。不同于拉裂-倾倒型,地下开采导致山顶泥质粉砂岩层产生拉张裂缝,裂缝在岩体内部沿缓倾结构面拓展(图7a),坡体在自身重力作用下沿缓倾结构面发生蠕动变形,前端灰岩岩层构成维持坡体稳定的锁固段(图7b),随着裂缝不

断向前拓展,坡体剪断锁固段发生失稳破坏(图 7c)。其主要特征是①控制性裂缝发育在砂岩岩层 中;②裂缝缓倾,深度较浅,类型滑坡堆积体粒 径一般不超过4m;③等效摩擦系数(*H/L*)大于 0.6,滑坡体运动距离相对较近,典型实例为箐脚 滑坡(L18)。



图 7 拉裂-剪断型滑坡变形模式图

Fig. 7 Deformation pattern of pull-clipping landslide

(a) Fracture development; (b) Formation of dangerous rock mass; (c) Slope failure

4 危险性评价

4.1 适应于鬃岭滑坡群的滑坡危险性评价公式

运动距离是崩滑灾害危害性评价和防治重要 的依据。滑坡岩性类别,运动机理,形成机制的 复杂性,给滑坡的运动距离计算带来了难度。虽 然影响滑坡运动距离的原因众多,但是将滑坡体 积和滑坡地形作为影响滑距最主要的因素成为研 究滑坡运动距离的共识。目前已有众多研究者提 出了许多模型和方法,建立了滑坡规模与运动距 离之间的联系 (詹威威等,2017;樊晓一等, 2018;唐然等,2018)。针对西南地区典型的岩质 滑坡-碎屑流这一灾害类型,郑光等 (2019)通过 运动距离与势能关系研究、量纲分析、模拟试验 和数据回归等方法,建立了滑坡体积、地形与堆 积体粒径结合的预测体系,总结出适应于岩质碎 屑流的运动距离计算公式:

$$l1 = 31.623 \times \left(\frac{d}{B}\right)^{0.321} \times (VH)^{0.25} \times (\tan\alpha)^{0.663}$$
(1)

公式中 V 为滑坡碎屑体体积; d 为停积区最 大粒径,其值为滑坡堆积体中最大粒径直径; H 为最大垂直运动距离,其值为滑坡前缘最低点与

表 2 模型修正采用的滑坡参数

Table 2 Landslide parameters used to modify the calculation model

后源最高点之间的高程差; α、B 为滑移区宽度 和坡度,其值为滑坡体在运移阶段平均宽度和坡 度; 11 为最大水平运动距离, 定义为滑坡前缘最 低点与后源最高点之间的水平距离。公式在针对 体积大于 10⁷ m³ 以上的崩滑灾害具有较强的实用 性, 在计算体积较小的崩滑灾害时结果偏高(郑 光等, 2019)。文中研究目的在于提取适用于上 硬下软层中发育的滑坡-碎屑流的改进公式,由 于该类型滑坡是滑坡碎屑流的一种特殊类型,因 此其相关计算因子满足公式1中的方程,仅需对 其系数进行修改。利用西南地区典型的上硬下软 岩层中的滑坡-碎屑流灾害信息,对公式进行修 正,提出一种适用于上硬下软岩层中发育的滑 坡-碎屑流的改进公式;其计算流程如下:第一 步提取已经失稳破坏的滑坡变形数据,包括滑坡 最大水平/垂直运动距离、停积区最大粒径、滑 移段宽度、滑移段坡度及滑坡体积(滑源面积); 第二步利用公式1计算最大水平运动距离(修正 前11值),确定修正前最大水平运动距离与实际 水平运动距离(11实际值)计算误差,对该偏差 进行平均,获取改进后的计算系数;第三步将修 正后的计算系数代入公式,并利用鬃岭区域典型 滑坡参数验证公式的可靠性。参数修正计算结果 见表 2。

滑坡	<i>l</i> 1 实际值/	d	<i>B</i> /	α/	V/	H/	修正前	修正后	修正前	修正后
间双	m	m	m	m	m ³	m	l1 值/m	l1 值/m	误差	误差
贵州鬃岭左家营滑坡	614	12	170	27	507700	301	960.13	603.87	56.4%	-1.7%
贵州鬃岭中岭滑坡	522	11	334	26	1142100	213	820.24	520.92	57.1%	-0.2%
贵州鬃岭中岭2号滑坡	333	10	152	33	38307	216	531.81	337.74	59.7%	1.4%
贵州尖山营1号滑坡	242	4	110	27	78500	129	393.72	250.04	62.7%	3.3%
贵州尖山营2号滑坡	244	2.5	100	28	103500	133	387.75	246.25	58.9%	0.9%
重庆甑子岩滑坡	683	8	210	39	500000	315	1079.00	685.24	58.0%	0.3%
湖北宜昌盐池河滑坡	604	5	150	33	1000000	246	998.32	634.01	65.3%	5.0%
贵州纳雍张家湾滑坡	718	14	200	32	493000	264	1053.15	668.83	46.7%	-6.8%
贵州纳雍煤冲滑坡	280	8	124	32	30348	176	461.76	293.25	64.9%	4.7%
贵州都匀马达岭滑坡	580	5	120	25	1900000	150	893.28	567.30	54.0%	-2.2%

此次获取了10个具有典型上硬下软岩性特征 的滑坡-碎屑流数据用于模型检验(表2)。滑坡数 据来源于野外实测及文献统计(高杨等,2020)。 0.1m高精度数字高程模型和Google earth光学影 像用于辅助提取距离。结果显示参照公式1计算结 果与实际结果存在较大差异,理论计算值相较于 实际运动位移值偏大,其结果具有趋势性,通过 对系数的修正可以抵消计算结果的偏差 (表 2)。 计算出实际与计算结果的偏差,对该偏差进行平均,获得适用于上硬下软层中发育的滑坡-碎屑流的改进公式:

$$l1 = 20.803 \times \left(\frac{d}{B}\right)^{0.321} \times (VH)^{0.25} \times (\tan\alpha)^{0.663}$$

(2)

通过调查鬃岭变形带区域5处已经溃滑的典型 岩质滑坡,根据滑坡碎屑体体积、停积区最大粒 径、最大垂直运动距离、最大水平运动距离、滑 移区宽度和坡度数据等参数信息,对公式2进行验 证(图3,表3)。其中体积由面积-体积计算公式 V = 1.315A^{1.208} (Xu et al., 2016) 计算,其余数据 来自光学遥感解译与野外地质调查。结果显示滑 坡最大水平运动距离计算误差在 5%以内,证明该 改进公式对于上硬下软层中的滑坡-碎屑流距离评 估具有良好的适用性。

表 3 改进后计算模型验证表

Table 3 Verification table of the improved calculation model

滑坡 (编号)	11 实际值/m	d/m	<i>B</i> /m	α/m	V/m^3	<i>H</i> ∕m	l1 计算值/m	误差
代家屋脊滑坡 (L10)	160	7	110	31	5269	120	166.86	4.29%
箐脚 2#滑坡 (L19)	267	7	82	36	8429	228	274.60	2.85%
大土寨滑坡 (L7)	260	8	105	35	9857	205	261.62	0.62%
张家麻窝滑坡 (L35)	200	3	21	31	2984	160	201.65	0.83%
半边街滑坡 (L1)	270	7	130	41	7800	230	262.20	-2.89%

4.2 高危变形体危险性评价

结合航摄数字地表模型和 InSAR 变形年均变 形速率信息,识别出左家营(L17)和箐脚(L18) 两处威胁较大的危险变形体。

4.2.1 左家营危险变形体

左家营危险变形体位于 L17 号滑坡滑源东侧,

其岩性为飞仙关组暗紫红色泥质粉砂岩和灰岩, 上覆大量松散第四纪土体及碎石。Stacking-InSAR 结果显示最大变形速率为-10 cm/a (图 8a),部分 变形区域出现失相干现象未能获得有效变形信息。 综合光学影像 (图 8b)、InSAR 图像及野外地质调 查图 (图 8c、8d)对不稳定区域进行圈定,其面



a--左家营变形体变形速率; b--左家营变形体无人机航摄照片; c、d--左家营变形体野外调查图 (c镜向 25°, d镜向 280°)

图 8 左家营危险变形体 InSAR 变形速率和野外调查图

Fig. 8 InSAR deformation rate map and field survey photo of the Zuojiaying deformed slope

(a) Deformation rate of the Zuojiaying deformed slope; (b) UAV aerial photo of the Zuojiaying deformed slope; (c, d) Field photos of the Zuojiaying deformed slope (c: towards 25° , d: towards 280°)

积约为 4242 m²,滑移段坡度 27°,堆积体最大粒径 12 m。在降雨和工程扰动作用下与可能发生失稳破坏,其变形模式为拉裂-倾倒型。

4.2.2 箐脚危险变形体

箐脚危险变形体位于 L18 号滑坡滑源北侧,岩性 为飞仙关组灰色层状灰岩和泥质粉砂岩,上覆松散第 四纪土体。Stacking-InSAR 显示变形体最大变形速率 -15 cm/a (图 9a)。综合光学影像 (图 9b)、InSAR 图像及野外地质照片 (图 9c、9d)对不稳定区域进 行圈定,其面积为 4385 m²,滑移段坡度 36°,堆积区 最大粒径 7 m。该变形发育多条长 10~80 m 不等的裂 缝,走向与滑源展布方向一致,裂缝最大错落高度达 0.5 m (图 9c、9d)。在降雨和工程扰动作用下与可能 发生失稳破坏,其变形模式为拉裂-剪断型。



a- 等脚变形体运动速率; b--等脚变形体无人机航摄照片; c、d--等脚变形体野外调查图 (c 镜向 9°, d 镜向 11°)

图 9 箐脚危险变形体 InSAR 变形速率和野外调查图

Fig. 9 InSAR deformation rate map and field photo of the Jingjiao deformed slope

(a) Deformation rate of the Jingjiao deformed slope; (b) UAV aerial photo of the Jingjiao deformed slope; (c, d) Field photos of the Jingjiao deformed slope (c: towards 9°, d: towards 11°)

利用公式2计算鬃岭滑坡群左家营和箐脚两处 危险变形体最大水平运动距离分别为386.25 m和 219.76 m,运动范围均达到下方农田及牲畜放牧范 围,需要对变形体加强监测并划定活动红线区, 避免人员伤亡。

5 问题与分析

文章利用综合宏观变形和小微变形对滑坡现 状进行描述,并对危险变形体进行识别。但在识 别与计算过程中存在漏译和误差,主要包括以下 几个方面。 (1)由于鬃岭滑坡群植被茂盛且高精度无人 机航摄照片在鬃岭滑坡群东侧部分缺失,野外地 质调查能够对结果进行补充,但鬃岭滑坡群山势 陡峭,通达性较差,因此解译结果可能少于实际 变形数量。

(2) InSAR 计算误差。首先,利用 InSAR 处 理获取的变形量是基于参考点的相对变形速率, 其绝对变形量值有待校正。其次,研究中仅使用 升轨数据进行计算,局部阴影叠掩区域变形信息 未能有效获取。此外,由于获取的 8 期 ALOS-2 数 据最大时间间隔为 112 天,也会造成变形失相干现 象,丢失部分区域变形信息。Stacking-InSAR 计算 结果可以较好的反映变形区的范围和强度,但由 于对大气和地形误差的去除能力较弱,变形速率 必将存在一定的系统偏差,但总体反映变形的差 异,不影响对变形区的划分。

(3)危险性计算误差。利用为经验公式对重 点滑坡进行距离分析时,由于危险滑坡体尚未发 生失稳变形,其滑坡体积(V)、地形(α、H)与 堆积体粒径(d)等参数是未知的,借助经验公式 及已有滑坡特征进行取值,计算结果尚待实际 检验。

6 结论

研究通过综合野外地质调查、无人机航空摄影、多源光学遥感、InSAR观测技术和解析公式计算对鬃岭变形带滑坡灾害进行了精细识别和危险性评价,得到以下结论。

(1)地下采煤活动是引起鬃岭桌山边缘山体变形的主要原因,InSAR观测结果显示鬃岭地区变形具有明显的带状特征,年平均变形速率为-20.4~10.2 cm/a,与下部采空区具有较好的对应关系,大位移区域集中在采煤沉降和斜坡重力叠加的桌山边缘地带。

(2) 鬃岭地区现存变形现象 64 处其中滑坡 37 处,裂缝 27条,危险变形体 2 处。滑坡主要发生 在飞仙关组深灰色灰岩岩层和暗紫红色泥质粉砂 岩岩层中,根据滑源岩性及变形特征将滑坡划分 为拉裂-倾倒和拉裂-剪断两种类型。其中拉裂-倾 倒型滑坡堆积体粒径大,运动距离远,威胁较大。

(3)获得岩质滑坡碎屑流滑移距离计算公式, 对鬃岭地区上硬下软地层中发育的采煤滑坡滑移 距离具有良好的适用性,验证误差在5%以内,利 用该公式对鬃岭滑坡群左家营和箐脚危险变形体 进行计算,预测危险避让距离在220~386 m。

致谢:本文 ALOS-2 雷达数据由贵州省第一测绘院 提供,纳雍县左家营煤矿提供部分地质及野外调 查资料,对以上单位一并表示感谢。

References

- CHENG Y, ZHANG J, CHEN J, 2019. Analysis on stability and hazard zone of dangerous rock mass in Zongling Town, Nayong of Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30 (4): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- DONG J, ZHANG L, LI M H, et al., 2018. Measuring precursory

movements of the recent Xinmo landslide in Mao County, China with sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 datasets [J]. Landslides, 15 (1): 135-144.

- FAN J H, GUO H D, GUO X F, et al., 2008. Monitoring subsidence in tianjin area using interferogram stacking based on coherent targets [J]. Journal of Remote Sensing, 12 (1): 111-118. (in Chinese with English abstract)
- FAN X M, XU Q, SCARINGI G, et al., 2019. The "long" runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report [J]. Landslides, 16 (1): 139-154.
- FAN X Y, HU X B, ZHANG R X, et al., 2018. Study on the open topography influence on the moving distances of landslides [J]. Journal of Natural Disasters, 27 (5): 188-196. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, HE K, LI Z, et al., 2020. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47 (4): 14-23. (in Chinese with English abstract)
- HAN D J, YANG C S, DONG J H, 2020. InSAR monitoring and analysis of landslide deformation after the earthquake in the Zhangmu port, Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 565-574. (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26 (3): 433-454. (in Chinese with English abstract)
- LI L J, YAO X, ZHANG Y S, et al., 2014. SBAS-InSAR technology based identification of slow deformation of geologic mass along section of China-Pakistan highway [J]. Journal of Engineering Geology, 22 (5): 921-927. (in Chinese with English abstract)
- LI W L, XU Q, LU H Y, et al., 2019. Tracking the deformation history of large-scale rocky landslides and its enlightenment [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44 (7): 1043-1053. (in Chinese with English abstract)
- LI Z H, SONG C, YU C, et al., 2019. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44 (7): 967-979. (in Chinese with English abstract)
- LIU G W, WANG C J, LI G H, et al., 2019. Application research on the remote sensing technology in geological disaster prevention and control of existing railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 36 (6): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- LIU X H, YAO X, ZHOU Z K, et al., 2018. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR [J]. Journal of Geomechanics, 24 (2): 229-237. (in Chinese with English abstract)
- LU H Y, LI W L, XU Q, et al., 2019. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44 (9): 1342-1354. (in Chinese with English abstract)
- STROZZI T, WEGMULLER U, WERNER C, et al., 2000. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year

accuracy [C] //IGARSS 2000. IEEE 2000 international geoscience and remote sensing symposium. Taking the pulse of the planet: the role of remote sensing in managing the environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120). Honolulu: IEEE: 2239-2241.

- TANG R, XU Q, WU B, et al., 2018. Method of sliding distance calculation for translational landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 39 (3): 1009-1019, 1070. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, WANG C, XIE C, et al., 2020. Monitoring of large-scale landslides in Zongling, Guizhou, China, with improved distributed scatterer interferometric SAR time series methods [J]. Landslides, 17 (8): 1777-1795.
- XU C, XU X W, SHEN L L, et al., 2016. Optimized volume models of earthquake-triggered landslides [J]. Scientific Reports, 6: 29797.
- YANG X Z, XUE L G, 1994. Natural resources for Tourism in Maoshi, Northen Suburb of Zunyi city and their classification [J]. Guizhou Geology, 11 (2): 161-166. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z P, JIANG Y W, LI B, et al., 2020. Study on the mechanism of deep and large fracture propagation and transfixion in karst slope under the action of mining [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 459-470. (in Chinese with English abstract)
- ZHAN W W, HUANG R Q, PEI X J, et al., 2017. Empirical prediction model for movement distance of gully-type rock avalanches [J]. Journal of Engineering Geology, 25 (1): 154-163. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M, WU L Z, ZANG J C, et al., 2019. The 2009 Jiweishan rock avalanche, Wulong, China: deposit characteristics and implications for its fragmentation [J]. Landslides, 16 (5): 893-906.
- ZHANG Y, WANG Y J, YAN S Y, 2016. Ground subsidence detection of peibei mining area based on stacking InSAR technology [J]. Coal Technology, 35 (7): 102-105. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J J, MA Y T, LIN B, et al., 2016. Geomechanical mode of Mining landslides with gently counter-inclined bedding: a case study of madaling landslide in Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35 (11): 2217-2224. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG D, FROST J D, HUANG R Q, et al., 2015. Failure process and modes of rockfall induced by underground mining: a case study of kaiyang phosphorite mine rockfalls [J]. Engineering Geology, 197: 145-157.
- ZHENG G, XU Q, PENG S Q, 2019. Calculation model of the longrunout distance of rock avalanche [J]. Rock and Soil Mechanics, 40 (12): 4897-4906. (in Chinese with English abstract)
- ZHU J J, LI Z W, HU J, 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 46 (10): 1717-1733. (in Chinese with English abstract)
- ZHUO B X, 2011. Remote sensing interpretation & application of

geology engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Press. (in Chinese)

附中文参考文献

- 程宇,张健,陈进,等,2019. 贵州纳雍骔岭镇危岩带稳定性及危害 范围分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报,30 (4):9-15.
- 范景辉, 郭华东, 郭小方, 等, 2008. 基于相干目标的干涉图叠加方 法监测天津地区地面沉降 [J]. 遥感学报, 12 (1): 111-118.
- 樊晓一,胡晓波,张睿骁,等,2018. 开阔型地形条件对滑坡运动距 离的影响研究 [J]. 自然灾害学报,27 (5):188-196.
- 高杨,贺凯,李壮,等,2020. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动 力学分析 [J]. 水文地质工程地质,47 (4):14-23.
- 韩冬建,杨成生,董继红,2020. 西藏樟木口岸震后滑坡灾害变形 InSAR 监测分析 [J]. 地质力学学报,26 (4):565-574.
- 黄润秋,2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J].岩 石力学与工程学报,26(3):433-454.
- 李凌婧,姚鑫,张永双,等,2014. 基于 SBAS-InSAR 技术的中巴公路(公格尔-墓士塔格段)地质体缓慢变形识别研究 [J].工程地质学报,22 (5):921-927.
- 李为乐,许强,陆会燕,等,2019. 大型岩质滑坡形变历史回溯及其 启示 [J]. 武汉大学学报,信息科学版,44 (7):1043-1053.
- 李振洪, 宋闯, 余琛, 等, 2019. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 44 (7): 967-979.
- 刘桂卫, 王长进, 李国和, 等, 2019. 遥感技术在既有铁路地灾防治 中应用方法研究 [J]. 铁道工程学报, 36 (6): 23-27.
- 刘星洪,姚鑫,周振凯,等,2018. 滑坡灾害 InSAR 应急排查技术方 法研究 [J]. 地质力学学报,24 (2):229-237.
- 陆会燕,李为乐,许强,等,2019. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江 白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别 [J]. 武汉大学学报・信息科 学版,44 (9):1342-1354.
- 唐然,许强,吴斌,等,2018. 平推式滑坡运动距离计算模型 [J]. 岩土力学,39 (3):1009-1019,1070.
- 杨秀忠,薛立根,1994. 遵义毛石旅游自然资源特征及景点类型划分[J].贵州地质,11(2):161-166.
- 杨忠平,蒋源文,李滨,等,2020.采动作用下岩溶山体深大裂隙扩 展贯通机理研究 [J].地质力学学报,26 (4):459-470.
- 詹威威,黄润秋,裴向军,等,2017. 沟道型滑坡-碎屑流运动距离 经验预测模型研究 [J]. 工程地质学报,25 (1):154-163.
- 张洋, 汪云甲, 闫世勇, 2016. 基于 Stacking InSAR 技术的沛北矿区 沉降监测 [J]. 煤炭技术, 35 (7): 102-105.
- 赵建军,马运韬,蔺冰,等,2016. 平缓反倾采动滑坡形成的地质力 学模式研究:以贵州省马达岭滑坡为例 [J]. 岩石力学与工程学 报,35 (11):2217-2224.
- 郑光,许强,彭双麒,2019. 岩质滑坡-碎屑流的运动距离计算公式 研究 [J]. 岩土力学,40 (12):4897-4906.
- 朱建军,李志伟,胡俊,2017. InSAR 变形监测方法与研究进展 [J]. 测绘学报,46 (10):1717-1733.
- 卓宝熙,2011. 工程地质遥感判释与应用 [M].2版.北京:中国 铁道出版社.