

基于倾斜摄影与InSAR技术的高位崩塌风险识别

王朋伟, 安玉科

High-level collapse risk identification based on oblique photography and InSAR technology

WANG Pengwei and AN Yuke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究

A study of the risk ranking method of landslides and collapses

解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 刘秀伟, 赵伟华, 张成强 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 184-192

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135-146

舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county

韩旭东, 付杰, 李严严, 王高峰, 曹琛 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 180-186

强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析

An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes

李娟, 何亮, 苟晓慧 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 157-163

高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板组合结构动力响应

Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact

吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 许泽鹏 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 114-122

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198-206



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208068](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208068)

王朋伟, 安玉科. 基于倾斜摄影与 InSAR 技术的高位崩塌风险识别 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 169-180.

WANG Pengwei, AN Yuke. High-level collapse risk identification based on oblique photography and InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 169-180.

基于倾斜摄影与 InSAR 技术的高位崩塌风险识别

王朋伟, 安玉科

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 崩塌风险识别是崩塌灾害防治的基础。高位崩塌一般具有突发性、隐蔽性、高差大等特点, 给信息采集、灾害识别和风险评估等工作带来了极大的挑战。针对这一工程难题, 以白龙江流域九龙峡高位斜坡为例, 基于倾斜摄影三维模型, 确定高位崩塌识别指标, 探索结构面信息提取方法, 提出赤平投影定性分析与 InSAR 定量分析相结合的崩塌风险评估模型, 形成了崩塌识别、稳定性分析和形变监测三者相结合的高位崩塌识别与风险评价的全过程模式。结果显示: (1) 2020 年 1 月—2022 年 6 月, 研究区斜坡最大累积变形量为 120 mm, 研究区东侧斜坡、西侧坡脚、南侧突出山咀变形较为强烈, 变形等级以一、二级为主, 灾害危险等级较高。(2) 研究区共有崩塌危岩体 22 处(高风险 7 处, 占 32%; 中风险 11 处, 占 50%; 低风险 4 处, 占 18%), 分布高度在 37~640 m 之间, 高风险危岩主要集中在南侧突出的山咀、东侧斜坡以及西侧坡脚地带。分析结果与公路灾害养护历史资料相吻合, 验证了倾斜摄影和 InSAR 技术在高位崩塌风险识别方面的可行性, 为该技术崩塌灾害防治方面的应用提供了依据和借鉴。

关键词: 高位斜坡; 崩塌; 倾斜摄影; InSAR 技术; 风险识别

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0169-12

High-level collapse risk identification based on oblique photography and InSAR technology

WANG Pengwei, AN Yuke

(Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co.Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: Collapse risk identification is the basis of collapse disaster prevention. High level collapse is characterized by sudden, hidden and large height difference, which brings great challenges to information collection, disaster identification and risk assessment. In order to solve this engineering problem, this paper takes the Jiulongxia high slope in the Bailong River basin as an example, Based on the 3D model of oblique photography, the establishment of high-level collapse identification index and its structural plane information extraction method, proposes a collapse risk assessment model combining stereographic projection qualitative analysis and InSAR quantitative analysis, and forms a whole process model of high level collapse identification and risk assessment combining collapse identification, stability analysis and deformation monitoring. The results show that there are 22 collapse dangerous rocks in the study area (including 7 high risk rocks, accounting for 32%, 11 medium risk rocks, accounting for 50%, and 4 low risk rocks, accounting for 18%), with a distribution height of 37 m – 640 m. High risk dangerous rocks are mainly concentrated in the prominent mountain mouth in the south,

收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2023-01-11

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 甘肃省科技重点研发项目(22YF11GA302); 甘肃省科技重大专项项目(1302GKDA009); 甘肃省交通厅科研项目(2021-25)

第一作者: 王朋伟(1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事地灾防治与监测预警研究工作。E-mail: 522751994@qq.com

the eastern slope and the western slope toe. These analysis results are consistent with the historical data of highway disaster maintenance, which verifies the feasibility of tilt photography and InSAR technology in high level collapse risk identification. The results provide a basis and reference for the application of this technology in collapse disaster prevention.

Keywords: high level slope; collapse; tilt photography; InSAR; risk identification

高位斜坡区是指位于高山峡谷的基岩斜坡,产生的主要地质灾害为岩质崩塌、泥石流和滑坡^[1],潜在地质灾害受植被覆盖的影响,具有一定的隐蔽性,而且所处位置较高,在调查过程中地调人员无法到达而常被疏忽^[2-3]。使得传统的斜坡灾害地质调绘方法对该类灾害评价时,效率低下、获取信息不够全面、人力成本高、危险性大^[4-7]。

近年来,随着倾斜摄影技术和 InSAR 技术的发展,地质调查传统现场工作模式得到了极大的改进,有力推动了地质灾害调查研究和地质灾害的早期识别技术的发展^[8]。利用倾斜摄影技术的“多角度”“高分辨率”的探测优势,依据灾害体的微地貌、纹理、色彩、形状等解译标志可以识别出具体的灾害类型及空间分布特点,提高灾害调查效率和准确率,为地质灾害隐患排查提供支撑^[9-12]。同时,根据倾斜摄影“高精度”三维几何模型提取灾害体关键信息,能够为灾害评估提供数据支持^[13-16]。InSAR 技术以相干波的相位差为依据实现对地表形变的中长期监测,具有多极化、监测精度高、覆盖范围广等特点。在理县黄泥坝滑坡^[17]、永靖县刘家峡段滑坡^[18]、茂县岷江段滑坡^[19]、舟曲县江顶崖滑坡^[20]以及中巴公路灾害^[21]早期识别中得到成功应用。

然而,在实际工程应用中,倾斜摄影技术侧重于基于经验模式定性评价崩塌灾害的危险性,对于崩塌识别、危险性判定主要依据技术人员的经验,判定结果往往因人而异,很难产生客观的评价;InSAR 技术虽然能够从危岩体的形变定量角度对灾害危险性进行评估,但对于高陡斜坡,受相位失相干和相位解缠等因素的影响,高植被覆盖和大梯度形变引起的干涉失相干会严重影响相位解缠的可靠性,降低监测精度^[22]。基于此,本文以白龙江流域九龙峡峡谷区高位斜坡崩塌灾害为例,提出倾斜摄影与 InSAR 技术相结合的手段,对公路沿线崩塌危岩进行风险评估。

1 研究区概况

白龙江流域九龙峡峡谷区位于青藏高原东部边缘的岷山山脉与西秦岭山脉交汇处,峡谷两岸绝壁之

间宽仅数十米,北岸属迭山山脉,南岸属岷山山脉(图 1)。

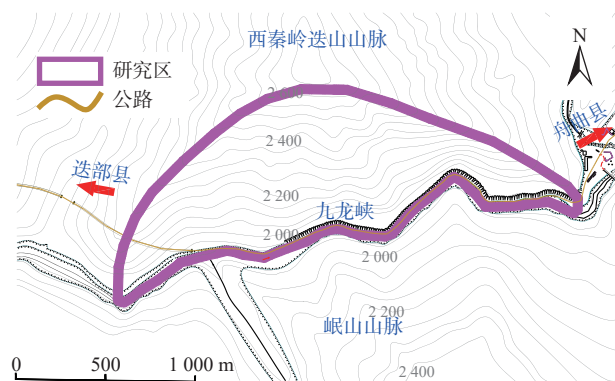


图 1 研究区地形图

Fig. 1 Landform map of the study area

研究区斜坡基岩裸露,主要以灰岩、板岩、千枚岩为主,受新构造运动的影响,山体剥蚀强烈,岩体破碎。坡面可见松散孤石,崩塌灾害问题频发,严重威胁 G345 公路的安全运行(图 2)。



图 2 研究区灾害历史记录

Fig. 2 Historical records of disasters in the project area

2 主要方法体系

工作方法体系见图 3,包含数据收集、崩塌信息提取、风险评价三部分。采用倾斜摄影的三维图谱与 InSAR 地表形变信息从形态和形变两方面进行灾害风险识别,判定斜坡崩塌隐患点位置、变形幅度、结构面等信息。根据风险评估判据,建立崩塌风险识别模型,实现高位崩塌风险评价。

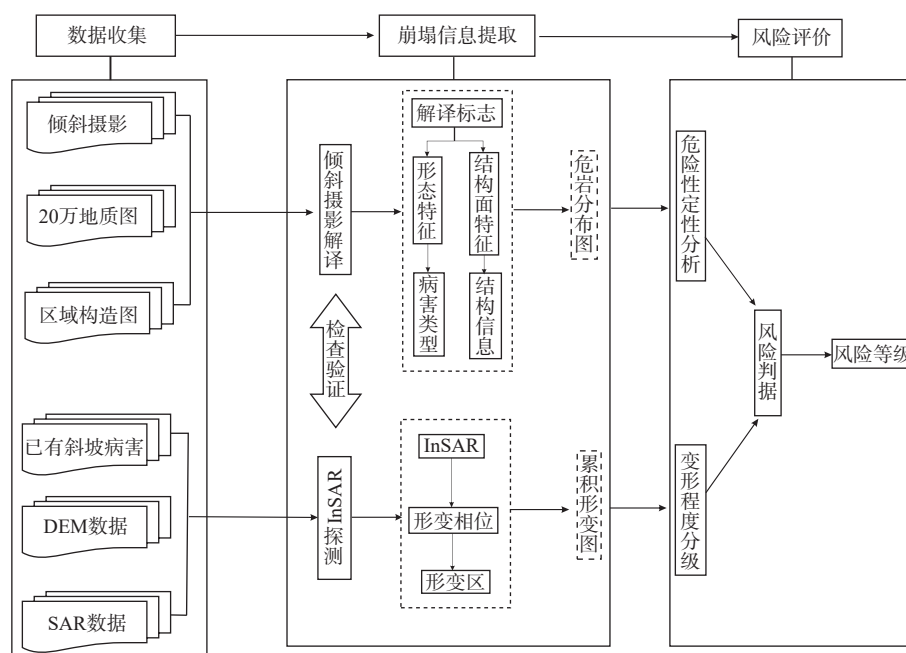


图3 高位崩塌风险识别工作方法体系

Fig. 3 Working method system for high collapse risk identification

2.1 基于倾斜摄影的高位崩塌危险性定性分析

2.1.1 高位崩塌隐患识别指标

高位斜坡是否发生崩塌由地质构造、地形地貌、岩体结构等多种因素共同作用影响^[23]。倾斜摄影不仅能够高分辨率、高精度地展现地物纹理和空间几何信息,还可以生成地表三维模型^[24],根据图像解译可获得斜坡构造、地形地貌、岩体结构、灾害分布等信息,为崩塌隐患识别提供决策依据。结合微地貌、岩体特征、历史迹象3大类指标以及其对应的11个特征指标,建立基于倾斜摄影的崩塌识别流程及关键指标体系,具体流程见图4。

微地貌特征是崩塌危岩体直观外在的表现形式,较大坡度能够为危岩启动崩塌提供动力,而孤立山咀、孤石、落石等分布地带通常是高位斜坡危岩体的发育地带。

高位斜坡失稳破坏受岩体结构面控制,结构面不利组合形成的欠稳定块体直接影响坡体的稳定^[25]。卸荷裂隙垂直切割岩体,通常形成拉裂缝,易产生倾倒崩塌破坏;外倾结构面是产生滑移崩塌破坏的基础;而碎裂或散列状岩体自稳能力较差,通常产生坠落或滚落破坏。

历史迹象是指历史上曾产生过崩塌破坏,可以从相关地名,比如“塌山”、“老虎咀”等具有崩塌意象的名称判别,也可以从养护资料或坡脚堆积体判别崩塌发生的规模和频率。

微地貌是危岩体直观的外在表现形式,岩体结构是判定岩体稳定性的必要条件,历史迹象是产生崩塌破坏的直接或间接考证。结合三者可判断高位斜坡是否具有产生崩塌的条件,进而通过11个特征指标对崩塌危岩体进行识别。

2.1.2 崩塌危险性定性评价

(1) 岩体结构面信息提取

斜坡岩体的稳定性主要受结构面的控制,岩体结构面在空间上属于三维平面,通过倾斜摄影可以快速获得其高精度的三维坐标。采用最小二乘法确定结构面的平面方程,结合解析几何的基本方法和产状空间特征,可以精确计算出结构面的倾角和倾向^[26]。

岩体结构面方程表示为: $aX + bY + cZ = d$, 其中 (a, b, c) 为平面的法向量。图5中 P_1 、 P_2 、 P_3 代表结构面不在一条直线的三个点, α 为倾角, β 为倾向, θ 为过 O 点的法向量与 H 轴夹角。根据岩体结构面产状与平面几何关系,可以得出平面法线向量与 Z 轴的夹角等于结构面倾角。

$$\alpha = \theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c}\right) \quad (1)$$

其中,结构面倾角 α 取值在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 间,故倾角最终值取其绝对值。

平面法线向量在 $X-Y$ 平面投影与 Y 轴(N 方向)的交角等于结构面倾向,即:

$$\beta = \arctan(a/b) \quad (2)$$

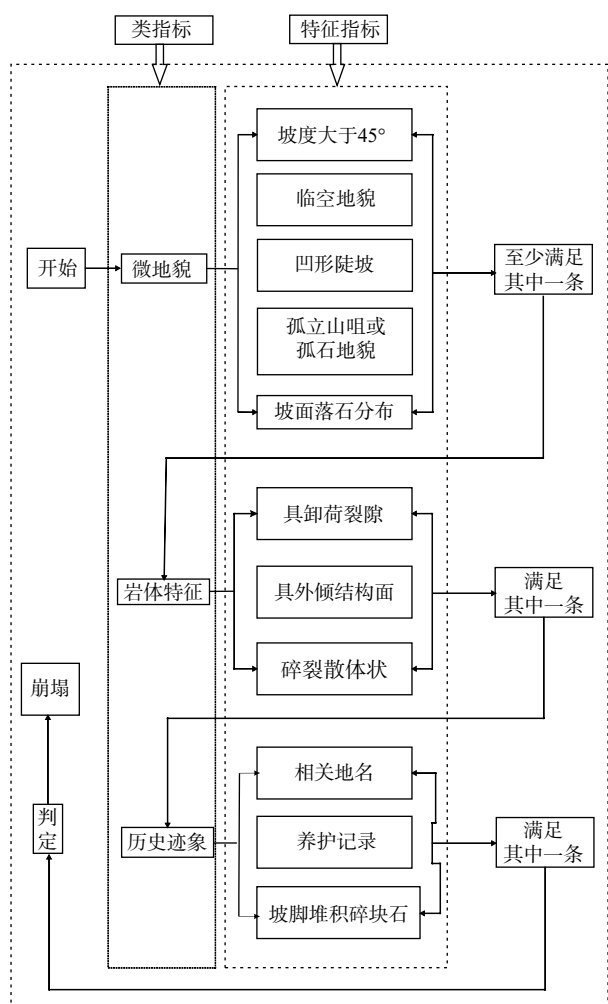


图 4 崩塌识别指标体系

Fig. 4 Collapse identification index system

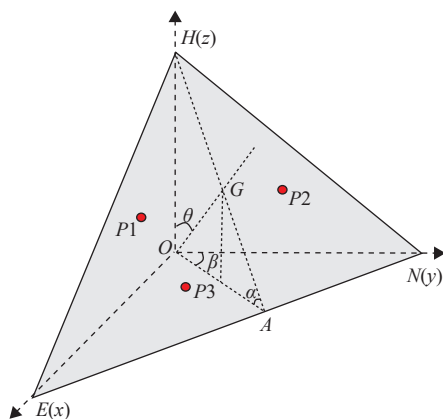


图 5 结构面产状几何关系图

Fig. 5 Geometric relationship diagram of the structural plane occurrence

其中倾向 β 取值在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 间,但反正切函数范围值为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 间,与倾向 β 取值区间不一致。通过 a 、 b 系数判断所处坐标系的象限,对倾向进行调整,即:

当 $b = 0$ 时,倾向位于坐标轴向,若 $a < 0$,则 $\beta = 90^\circ$,若

$a > 0$,则 $\beta = 270^\circ$,若 $a = 0$,则表示为水平地层;

当 $a < 0$ 并且 $b < 0$ 时,属于第一象限,即 $\beta = \beta$;

当 $a < 0$ 并且 $b > 0$ 时,属于第二象限,即 $\beta = 180^\circ + \beta$;

当 $a \geq 0$ 并且 $b > 0$ 时,属于第三象限,即 $\beta = 180^\circ + \beta$;

其他情况,则属于第四象限,即 $\beta = 360^\circ + \beta$ 。

通过以上原理,利用倾斜摄影三维几何特征获取岩体结构面上 3 个不同点的坐标便可确定结构面方程,根据式(1)(2)可计算出岩体结构面的倾角和倾向。

(2)危险性定性评价

赤平投影分析是岩质斜坡稳定性评价的一种定性分析方法,目前在工程界广泛的应用^[27-28]。其目的是将结构面三维空间问题转化为平面问题,可简洁、直观地展现不同结构面空间组合关系、组合块体与坡向关系来研究斜坡的稳定性。

一般赤平投影分析结果可分为稳定、基本稳定、不稳定 3 个等级,其与边坡稳定状态划分不一致。龙海涛^[29]提出将赤平投影分析结果由原来的 3 级划分为 4 级(不稳定、欠稳定、基本稳定和稳定),同时参考了《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[30]结构面(交割线)的倾角 $<27^\circ$ 时可判定边坡稳定的指标。改进后的赤平投影评价指标见表 1,可通过岩体边坡稳定性来间接定性评价崩塌危岩体的危险性。

表 1 边坡稳定性分级评价表

Table 1 Slope stability classification and evaluation index

稳定性分级	评价指标
稳定	结构面倾角或交棱倾角 $\leq 15^\circ$ 结构面倾角或交棱倾角 $\geq$ 边坡角 结构面倾向或交棱倾向与坡向夹角 $\geq 60^\circ$
基本稳定	结构面倾向或交棱倾向与坡向夹角 $<45^\circ$, $15^\circ \leq$ 结构面倾角或交棱倾角 $<25^\circ$, $45^\circ <$ 结构面倾向或交棱倾向与坡向夹角 $\leq 60^\circ$, $15^\circ \leq$ 结构面倾角或交棱倾角 $<$ 边坡角
欠稳定	结构面倾向或交棱倾向与坡向夹角 $<25^\circ$, $25^\circ \leq$ 结构面倾角或交棱倾角 $<40^\circ$, $25^\circ <$ 结构面倾向或交棱倾向与坡向夹角 $\leq 45^\circ$, $25^\circ \leq$ 结构面倾角或交棱倾角 $<$ 边坡角
不稳定	结构面倾向或交棱倾向与坡向夹角 $\leq 25^\circ$, $40^\circ \leq$ 结构面倾角或交棱倾角 $<$ 边坡角

2.2 基于 SBAS-InSAR 技术的高位崩塌危险性定量分析

采用 C 波段 Sentinel-1A 雷达数据和 SBAS-InSAR 时序技术开展高位斜坡地表形变监测,提取崩塌危岩区形变空间分布特征,可作为危险性定量评价的依据。

SBAS-InSAR 时序方法是基于较短时空基线的影像对进行干涉、多视处理形成高相干的干涉图,有效降低了相位噪声,获得高相干像元,应用奇异值分解求得多个小基线集合,得到整个时间段的变形序列。同

时 SBAS-InSAR 技术减少了处理中的去相关、高程、大气误差的影响,得到整个变形的时间序列,缩短了地表形变监测的观测周期,能够获取长时间缓慢地表形变的演变规律^[31]。因此,SBAS-InSAR 技术采用小基线克服了时间和空间上的失相干的影响,可通过少量的 SAR 数据来获取较可靠的监测结果,更适合于山区的地表形变监测。

2.3 崩塌灾害风险评估模型

2.3.1 地质灾害风险评估原理

地质灾害风险是空间尺度地质灾害发生的可能性、概率以及并导致对承灾体造成损失水平的可能性^[32],具有自然和社会属性。其定量评价模型表达如下:

$$R = S \cdot P \cdot V \tag{3}$$

式中: R ——地质灾害风险值,指地质灾害对承灾体造成的危害或损失;

S ——地质灾害的易发性值,指的是空间尺度发生灾害的可能性大小;

P ——诱发因素作用下发生地质灾害的概率;

V ——对承灾体损坏程度。

乘积 $S \cdot P$ 为地质灾害危险性值 H ,指的是空间和时间尺度地质灾害发生的概率。

2.3.2 崩塌风险评估模型

地质灾害风险是灾害的危险性与承灾体面临损失的综合性质。对于承灾体为公路时,其风险主要由灾害危险性决定,可见公路灾害风险评估的前提是准确的地质灾害危险性评价。

(1)崩塌危险性评价

工程上多采用赤平投影原理评价分析基岩斜坡区危岩块体的危险性。该方法的块体总体表现为整体性滑移破坏,不考虑块体倾倒、坠落等变形破坏形式,不适用于多个滑面(大于 2 个滑面)的块体以及因高应力、岩性较软、应力变化引起的稳定性分析问题^[33]。另外块体稳定性不仅和交棱倾角有关,还受块体形态特征、结构面抗剪强度、失稳模式(单面滑动或双面滑动)等影响。故赤平投影分析是一种概率性的假定,并不能反映实际坡体危险性状况。

高位斜坡高差大,坡度陡,受限于 SAR 卫星固有的侧视成像特点,在侧视成像过程中地形起伏会使得雷达影像中产生叠掩和阴影现象^[34-36],直接影响 InSAR 技术在后续处理过程中的相位解缠,降低监测精度,进而可能造成对危岩危险性评价的误判。

因此,采用赤平投影定性分析与 InSAR 监测定量分析相结合方法评价崩塌危岩体的危险性,可以最大程度

弥补彼此分析方法的不足,提高危险性评价的准确性。

(2)崩塌风险性评估模型

危险性等级可定性划分为不稳定、欠稳定、基本稳定、稳定四类,按照对等原则,InSAR 技术获取的变形值大小划分为四类,见表 2。变形值小于 20 mm 为噪声影响区,坡体处于稳定状态,划分等级为第四级,其余等级以 50 mm、90 mm 为界限划分为三至一级,分别对应基本稳定、欠稳定、不稳定。危险性等级从高到低设定发生概率区间,分值的大小与危岩体直径大小、高度、地形等有关,直径小、高度小、坡度小,则取小值,调整幅度为 0~10 分。权重 R 按照危岩体对承灾体危害程度判断,直接危害取 1.0,间接危害取 0.5,无危害取 0。结合表 2、式(4)与表 3 建立崩塌风险评估模型,风险等级分为低风险、中风险、高风险。

判据规则:

$$T = (K_i + S_j)R \tag{4}$$

式中: T ——风险评判值;

K_i ——第 i 级稳定性等级评分;

S_j ——第 j 级 InSAR 变形等级评分;

R ——危岩体对承灾体危害程度。

表 2 崩塌危岩体风险评价指标
Table 2 Risk assessment index of collapse dangerous rock mass

一级指标	二级指标	等级划分	分值	权重(R)	评分
稳定性评价	见表1	不稳定	40~50	0~1	K_1
		欠稳定	30~40	0~1	K_2
		基本稳定	20~30	0~1	K_3
		稳定	10~20	0~1	K_4
InSAR 变形等级	>90 mm	一级	40~50	0~1	S_1
	90 ~ 50 mm	二级	30~40	0~1	S_2
	50 ~ 20 mm	三级	20~30	0~1	S_3
	<20 mm	四级	10~20	0~1	S_4

表 3 崩塌危岩风险判据
Table 3 Criteria for risk identification of dangerous rock collapse

评判值	<50	50 ~ 75	>75
级别	低风险	中风险	高风险

注: 该评判标准与发生概率相对应。

3 案例分析

3.1 数据源

(1)倾斜摄影数据源

研究区面积约 7 km²,测量基准采用国家 2000 坐标系,1985 国家高程基准。经过数据采集、空三解算、模型生成等几个关键步骤生成三维模型,精度达

到厘米级,满足地质灾害风险识别提取的精度要求,见图 6。

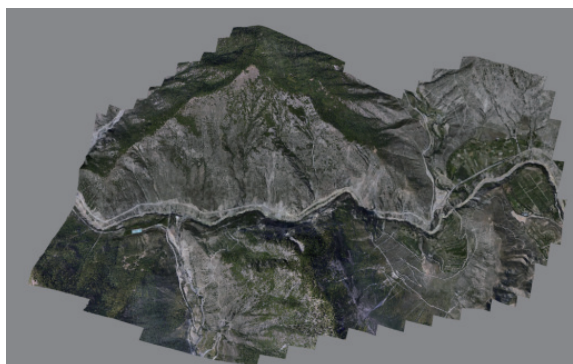


图 6 研究区倾斜摄影图

Fig. 6 Oblique photograph of the study area

(2) InSAR 数据源

SBAS-InSAR 处理方法所涉及的数据源主要为卫星 SAR 影像和 DEM 高程数据。

采用 19 景 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像,该卫星搭载 C 波段 SAR 传感器,波长 5.6 cm,幅宽 250 km,空间分辨率为 5 m×20 m,时间跨度为 2020 年 1 月至 2022 年 6 月,见图 7。高程数据采用 SRTM 30 米分辨率 DEM 数据。

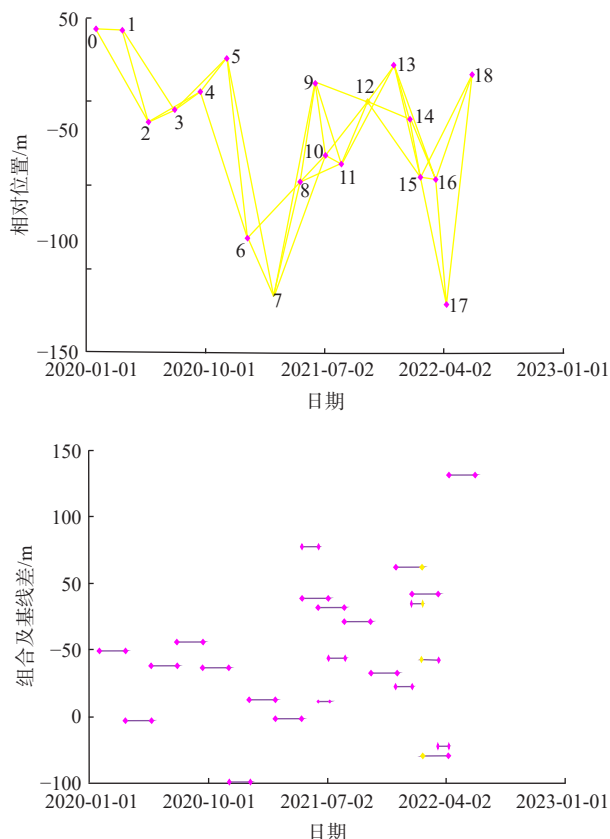


图 7 时空基线图

Fig. 7 Space-time baseline diagram

3.2 高位崩塌灾害识别

依据崩塌识别指标体系,结合专家解译获得研究区崩塌危岩体分布特征、岩体的结构面信息和空间几何信息,见图 8、图 9。研究区崩塌危岩体共 22 处,分布高度在 37~640 m(表 4)。其中岩质崩塌体 18 处,占 82%,直接威胁公路安全 12 处,岩性为灰岩、板岩,具外倾结构面或卸荷裂隙,历史上多次产生崩塌灾害;6 处位于坡面泥石流流域范围,多转换为泥石流物源,岩性为板岩、千枚岩为主,对公路不产生直接危害。土质崩塌 4 处,占 18%,其中 3 处位于坡脚斜坡段,地层为碎块石土,多滑塌破坏,历史上曾多次掩埋公路;1 处属于高阶地卵石,主要以风化剥落为主。

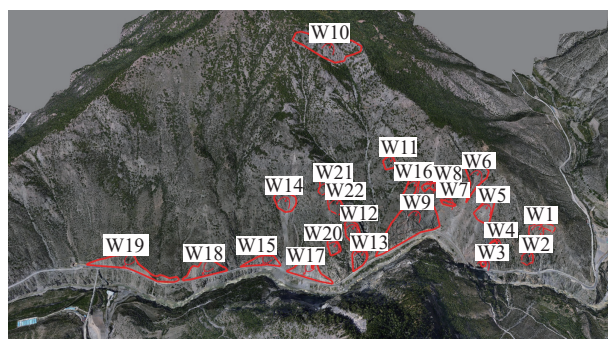


图 8 研究区崩塌危岩解译图

Fig. 8 Interpretation map of collapse dangerous rocks in the study area

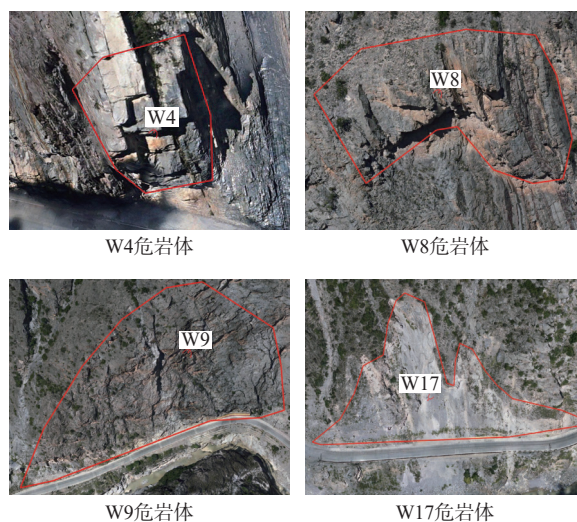


图 9 研究区典型危岩解译图

Fig. 9 Interpretation map of the typical dangerous rocks in the study area

3.3 危岩体结构信息提取

通过倾斜摄影采集危岩体结构面三维坐标,利用式(1)(2)构建结构面方程进行产状信息提取(见图 10)。

表 4 崩塌识别解译表

Table 4 Interpretation for collapse recognition

代表区域	崩塌类型	岩性	坡体结构	岩体特征	结构面发育情况	距离路面高度/m	是否直接威胁公路
W1、W17、W18、W19	土质	碎块石土	土质、类土质坡体结构	石夹土状		160、70、39、45	是
W2、W3、W4、W9、W13、W15	岩质	灰岩夹板岩	层状斜向结构	薄-中厚层状	具外倾结构面、卸荷裂隙发育	80、110、37、161、76、45	是
W12、W20、W21、W22	岩质	灰岩	碎裂结构	碎裂镶嵌结构状	构造裂隙密集	165、160、175、195	是
W7、W8	岩质	灰岩	层状斜向结构	薄-中厚层状	底部悬空	165、235	是
W5	岩质	千枚岩、板岩	碎裂结构	碎裂镶嵌结构状	构造风化裂隙密集	197	否
W6、W10	岩质	千枚岩、板岩	反倾-斜向结构	薄层状、板状	风化裂隙发育	310、640	否
W11、W14、W16	岩质	灰岩	层状斜向结构	薄-中厚层状	具外倾结构面、卸荷裂隙发育	345、235、345	否



图 10 W4 崩塌体结构面全局-细节图

Fig. 10 Global-detailed view of the structural surface of the W4 collapse body

共采集 40 组结构面,图 11 表示结构面的走向玫瑰图和等密度图。

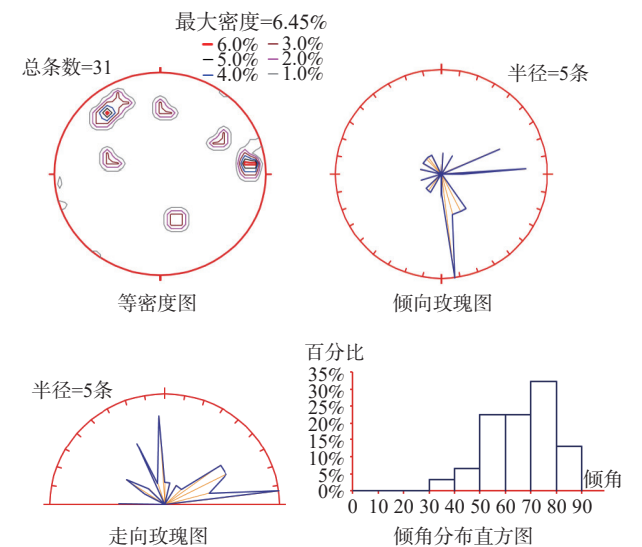


图 11 危岩体节理裂隙统计图

Fig. 11 Statistics of joints and fissures of dangerous rock mass

从统计分析中可以看出,结构面倾角较陡,其中 50°~90°占 90.3%,这些结构面中具有走向为 NEE 和 NNW 的两组优势结构面。岩体受 X 共轭节理控制,多被切割成块状或碎裂状,在重力、降雨以及地震等因素作用下极易产生崩塌破坏。

由此可见,倾斜摄影能够快速识别高位崩塌及其

岩体大型优势结构面信息。随着倾斜摄影的精度提高,对岩体裂隙、节理以及胶结物能够达到初步判识,提高岩体结构面识别的准确性、快速性以及安全性,为崩塌稳定性评价提供数据支持。

3.4 高位斜坡崩塌风险识别

3.4.1 斜坡危岩危险性定性评价

岩体结构面及其抗剪强度是控制岩质崩塌破坏的关键因素。对研究区公路有直接威胁的危岩体岩性为灰岩、板岩,结构面类型为硬性结构面,多张开,少填充,结合程度差。通常结构面的抗剪强度参数需根据现场原位试验确定,但实施困难,不易操作,依据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[36]确定结构面综合摩擦角为 25°。为此,以研究区崩塌危岩体为评价对象,根据岩体结构面参数和坡度信息,采用表 1 赤平投影分析方法,对危岩体进行稳定性评估,为危险性定性评价提供依据(表 5、图 12)。

3.4.2 斜坡危岩危险性定量评价

首先采用 SBAS-InSAR 方法反演研究区斜坡形变,然后依据表 2 中变形等级划分规则对形变进行量级分区,最后叠加在遥感影像上形成形变分布图(图 13),为斜坡危岩体危险性定量评价提供依据。图中不同色块可以直观反映斜坡空间形变特征,其中负值代表远离卫星 LOS 向的位移,图形中显示为红色;正值代表地物变形靠近卫星 LOS 向的位移,图中显示

表 5 边坡优势结构面信息及破坏评价 (W4、W7 为例)

Table 5 Slope dominant structural plane information and damage evaluation (W4 and W7 as examples)								
代表区域	结构面编号	产状	形态	填充特性	间距/cm	张开度/mm	稳定性评价	失稳模式
W4	P0	187°∠55°						
	S0	69°∠74°	平直	钙泥质胶结	100		不稳定	滑移
	J1	168°∠48°	平直	岩屑断续填充	100	3		
	J2	333°∠77°	平直	岩屑断续填充	150	5		
W7	P0	170°∠53°					稳定	坠落式
	S0	30°∠49°	平直	钙泥质胶结	130			
	J1	180°∠62°	平直	岩屑断续填充	50	2		
	J2	300°∠53°	平直	岩屑断续填充	50	2		

注: P为坡面, S为岩层层面, J为岩体节理。

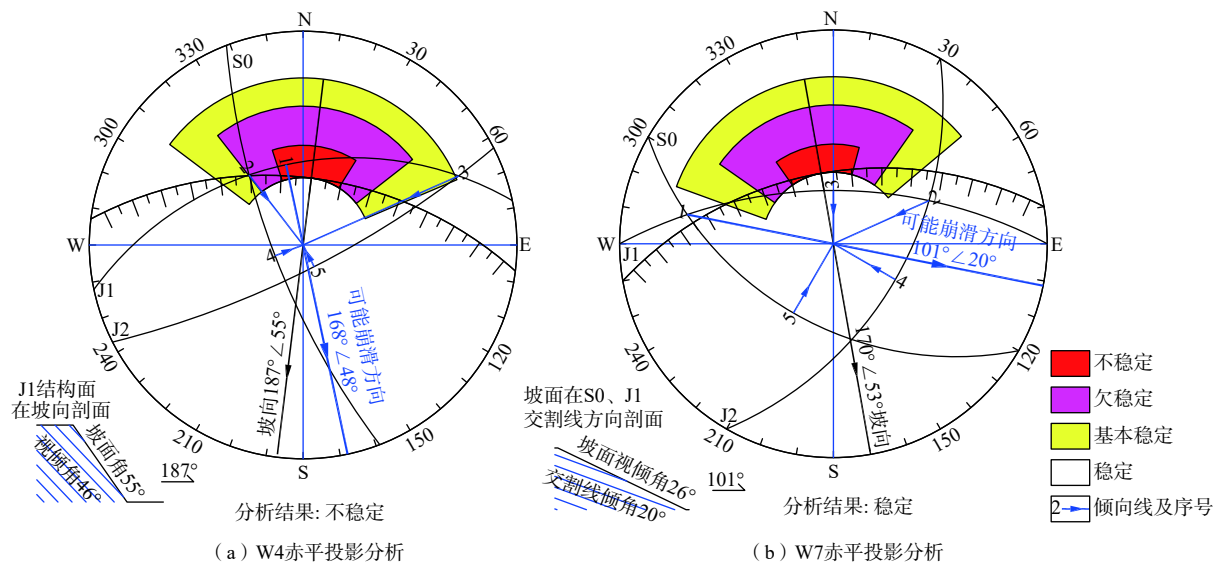


图 12 崩塌体稳定性分析图

Fig. 12 Analyses of the stability of the collapsed body

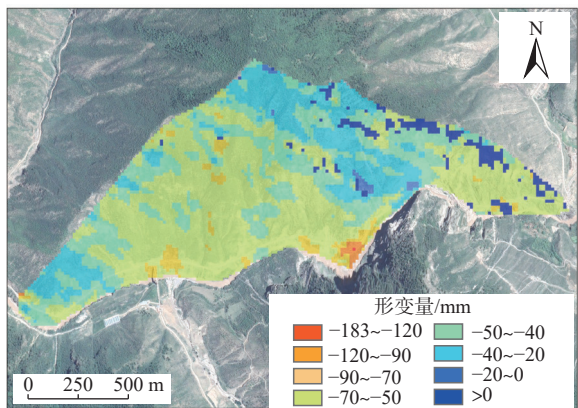


图 13 研究区斜坡定量变形图

Fig. 13 Deformation map of slopes in the study area

为蓝色。研究区最大变形量为-120 mm, 位于南侧突出山咀处, 其时间序列形变见图 14。InSAR 形变分析结果表明, 研究区东侧斜坡、西侧坡脚、南侧突出山

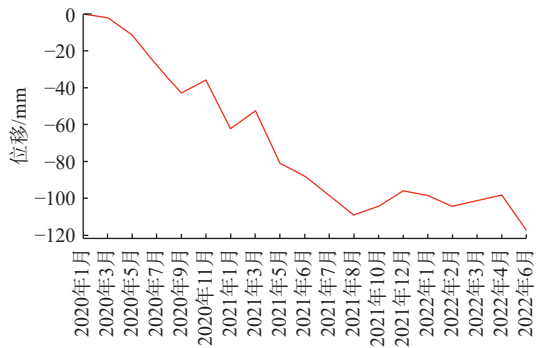


图 14 最大变形点时间序列

Fig. 14 Time series of the maximum deformation point

咀变形较为强烈, 变形等级以一、二级为主, 灾害危险等级较高, 威胁沿江公路的安全。

3.4.3 研究区崩塌灾害风险评估结果

结合崩塌危岩体的空间分布特征、危险性等级及其对公路的影响条件, 利用 2.3.2 节建立的崩塌灾害风

险评估模型,对研究区危岩体进行风险评估(表 6),形成崩塌风险等级评价图(图 15)。通过分析计算得出:研究区高风险危岩体 7 处,占 32%;中风险 11 处,占 50%,低风险 4 处,占 18%。高风险危岩主要集中于南侧突出山咀、东侧斜坡以及西侧坡脚地带,风险等级区域及位置与公路灾害养护历史资料相吻合,证明该

方法的有效性。南侧突出的山咀段受断层影响,岩体破碎,坡面浮石发育,发生高位崩塌风险高,急需防治,建议采用棚洞通过。东侧斜坡发育高风险危岩,斜坡坡度较陡,施工困难,不宜采用主动防护措施。西侧斜坡坡脚分布大量土质滑塌体,以浅层蠕滑破坏为主,雨季易造成交通中断,建议采取抗滑支挡措施。

表 6 危岩风险等级评价表
Table 6 Risk level evaluation of dangerous rocks

编号	稳定性评价	稳定性得分	变形等级	变形得分	威胁对象	权重	总分	风险等级
W1	不稳定	40	二级	30	公路	1	70	中风险
W2	不稳定	45	二级	35	公路	1	80	高风险
W3	欠稳定	35	一级	40	公路	1	75	中风险
W4	不稳定	50	四级	15	公路	1	65	中风险
W5	不稳定	45	二级	35	公路	1	80	高风险
W6	不稳定	45	二级	30	公路	1	75	中风险
W7	稳定	20	三级	30	公路	1	50	中风险
W8	稳定	20	三级	30	公路	1	50	中风险
W9	不稳定	50	三级	25	公路	1	75	中风险
W10	欠稳定	30	三级	20	沟谷	0.5	25	低风险
W11	欠稳定	30	三级	25	沟谷	0.5	27.5	低风险
W12	不稳定	50	二级	30	公路	1	80	高风险
W13	不稳定	50	一级	45	公路	1	95	高风险
W14	欠稳定	30	二级	30	沟谷	0.5	30	低风险
W15	不稳定	40	二级	30	公路	1	70	中风险
W16	欠稳定	35	三级	25	沟谷	0.5	30	低风险
W17	不稳定	40	二级	35	公路	1	75	中风险
W18	不稳定	40	二级	35	公路	1	75	中风险
W19	不稳定	40	一级	45	公路	1	85	高风险
W20	不稳定	45	二级	35	公路	1	80	高风险
W21	不稳定	50	三级	30	公路	1	80	高风险
W22	不稳定	50	三级	25	公路	1	75	中风险

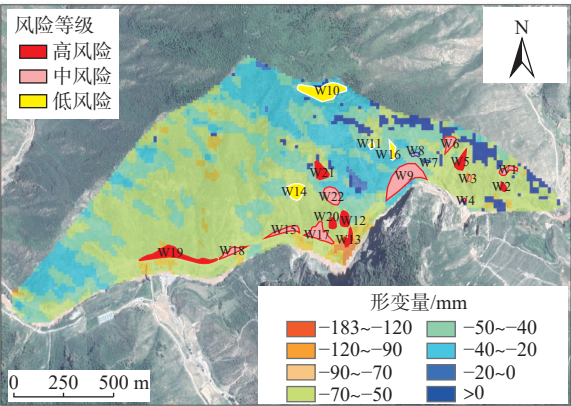


图 15 研究区崩塌风险等级评价图

Fig. 15 Assessment map of collapse risk grade in the study area

4 结论及建议

(1)根据研究区倾斜摄影资料解译发现崩塌 22

处,分布高度在 37~640 m 之间。其中岩质崩塌体 18 处,占 82%,土质崩塌 4 处,占 18%。

(2)根据结构面信息提取技术在研究区共获取危岩体结构面信息 40 组,其中倾角为 50°~90°的结构面占 90.3%,这些结构面中具有走向为 NEE 和 NNW 的两组优势结构面。

(3)InSAR 监测结果表明,2020 年 1 月至 2022 年 6 月,研究区斜坡最大累积变形量为 120mm。研究区东侧斜坡、西侧坡脚、南侧突出山咀变形较为强烈,变形等级以一、二级为主,灾害危险等级较高。

(4)结合崩塌危岩体的空间分布特征、危险性等级及其对公路的影响条件,采用崩塌灾害风险评估模型获得研究区崩塌风险等级评价图。结果表明:研究区危岩体处于高风险有 7 处,占 32%,中风险 11 处,占 50%,低风险 4 处,占 18%。高风险危岩主要集中于

南侧突出山咀、东侧斜坡以及西侧坡脚地带,与公路灾害养护历史资料相吻合,证明了本文模型的合理性。

通过以上研究可以看出,充分利用倾斜摄影的三维图谱信息与 InSAR 形变信息从形态和形变两方面能够快速对高位崩塌进行风险识别,后续可通过激光多普勒测振等遥感监测技术对这些高风险岩体进行重点监测,进而实现山区地质灾害早期预警预防。

参考文献 (References):

- [1] 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 with English abstract)]
- [2] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等.重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):949-956. [GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949-956. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 许强,陆会燕,李为乐,等.滑坡隐患类型与对应识别方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(3):377-387. [XU Qiang, LU Huiyan, LI Weile, et al. Types of potential landslide and corresponding identification technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(3): 377-387. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘传正.崩塌滑坡灾害风险识别方法初步研究[J].工程地质学报,2019,27(1):88-97. [LIU Chuanzheng. Analysis methods on the risk identification of landslide disasters[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 88-97. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 罗刚,程谦恭,沈位刚,等.高位高能岩崩研究现状与发展趋势[J].地球科学,2022,47(3):913-934. [LUO Gang, CHENG Qiangong, SHEN Weigang, et al. Research status and development trend of the high-altitude extremely-energetic rockfalls[J]. Earth Science, 2022, 47(3): 913-934. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘传正.地质灾害防治研究的认识论与方法论[J].工程地质学报,2015,23(5):809-820. [LIU Chuanzheng. Epistemology and methodology on geo-hazard research[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 809-820. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 俊豪,魏云杰,梅傲霜,等.基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析[J].中国地质,2021,48(2):388-401. [WANG Junhao, WEI Yunjie, MEI Aoshuang, et al. Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 388-401. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周福军.高原复杂山区铁路无人机倾斜摄影勘察技术应用研究[J].铁道标准设计,2021,65(6):1-5. [ZHOU Fujun. Application of unmanned aerial vehicle oblique photography survey technology for railway in complex plateau mountain area[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 潘文明,王德高.基于无人机低空航摄的典型地质灾害识别研究——以滑坡、泥石流、崩塌为例[J].宿州学院学报,2021,36(12):53-57. [PAN Wenming, WANG Degao. Identification of typical geological hazards based on low altitude aerial photography by unmanned aerial vehicles: Taking landslide, debris flow and collapse as examples[J]. Journal of Suzhou University, 2021, 36(12): 53-57. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 梁京涛,铁永波,赵聪,等.基于贴近摄影测量技术的高位崩塌早期识别技术方法研究[J].中国地质调查,2020,7(5):107-113. [LIANG Jingtao, TIE Yongbo, ZHAO Cong, et al. Technology and method research on the early detection of high-level collapse based on the nap-of-the-object photography[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(5): 107-113. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 廖斌,杨根兰,覃乙根,等.基于无人机技术的高陡危岩体参数获取及稳定性评价[J].路基工程,2021(4):24-29. [LIAO Bin, YANG Genlan, QIN Yigen, et al. Parameter acquisition and stability evaluation of high steep and dangerous rock mass based on UAV[J]. Subgrade Engineering, 2021(4): 24-29. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张欢,巨能攀,陆渊,等.基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析[J].水文地质工程地质,2021,48(6):171-179. [ZHANG Huan, JU Nengpan, LU Yuan, et al. Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV[J].

- Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 171 – 179. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吕权儒, 曾斌, 孟小军, 等. 基于无人机倾斜摄影技术的崩塌隐患早期识别及影响区划分方法[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 313 – 325. [LÜ Quanru, ZENG Bin, MENG Xiaojun, et al. Early identification and influence range division method of collapse hazards based on UAV oblique photography technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 313 – 325. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 宋珺敏. 基于多源数据的岩体结构面智能识别方法与信息解译研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016. [SONG Junmin. Research on intelligent identification method and information interpretation of rock mass structural plane based on multi-source data[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 宣程强, 章杨松, 许文涛. 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 75 – 83. [XUAN Chengqiang, ZHANG Yangsong, XU Wentao. Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 75 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 宋来臣, 庞凤波, 李秀娟. SBAS-InSAR干涉技术在滑坡早期识别中的应用研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(5): 234 – 236. [SONG Laichen, PANG Fengbo, LI Xiujuan. Study on application of SBAS-InSAR interference technology in early landslide identification[J]. Modern Mining, 2022, 38(5): 234 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴东霖, 葛伟鹏, 魏聪敏, 等. 黄河流域刘家峡—兰州段滑坡灾害的InSAR识别及成因分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(3): 607 – 614. [WU Donglin, GE Weipeng, WEI Congmin, et al. Identification and cause analysis of potential landslides in Liujiaxia-Lanzhou section of the Yellow River Basin with InSAR technique[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 607 – 614. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李梦华, 张路, 董杰, 等. 四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1529 – 1537. [LI Menghua, ZHANG Lu, DONG Jie, et al. Detection and monitoring of potential landslides along Minjiang River valley in Maoxian County, Sichuan using radar remote sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1529 – 1537. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 韩旭东, 付杰, 李严严, 等. 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 180 – 186. [HAN Xudong, FU Jie, LI Yanyan, et al. A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 180 – 186. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 赵富萌, 张毅, 孟兴民, 等. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 142 – 152. [ZHAO Fumeng, ZHANG Yi, MENG Xingmin, et al. Early identification of geological hazards in the Gaizi valley near the Karakoran Highway based on SBAS-InSAR technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 142 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485 – 1519. [LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Interferometric synthetic aperture radar for deformation mapping: Opportunities, challenges and the outlook[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1485 – 1519. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王颂, 张路青, 周剑, 等. 青藏铁路设兴村段崩塌特征分析与运动学模拟[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 784 – 792. [WANG Song, ZHANG Luqing, ZHOU Jian, et al. Characteristic analysis and kinematic simulation of rockfall along Shexing village section of Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 784 – 792. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘帅, 陈建华, 王峰, 等. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建[J]. 地质科学, 2022, 57(3): 945 – 957. [LIU Shuai, CHEN Jianhua, WANG Feng, et al. Construction of a 3D model of digital outcrop real scene based on UAV oblique photography[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2022, 57(3): 945 – 957. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 徐国良, 张振飞, 裴伦培, 等. 用有限元强度折减法评价节理岩质边坡稳定性[J]. 山东国土资源, 2021, 37(5): 59 – 66. [XU Guoliang, ZHANG Zhenfei, PEI Lunpei, et al. Slope stability evaluation of the rock mass by using finite element strength reduction method[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(5): 59 – 66. (in

- Chinese with English abstract)]
- [25] 葛云峰, 夏丁, 唐辉明, 等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3050 – 3061. [GE Yunfeng, XIA Ding, TANG Huiming, et al. Intelligent identification and extraction of geometric properties of rock discontinuities based on terrestrial laser scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3050 – 3061. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 杨洪. 水电工程高陡边坡小型危岩体动力分析及治理[J]. 水电站设计, 2017, 33(1): 36 – 39. [YANG Hong. Dynamic analysis and treatment of small dangerous rock mass on high and steep slope of hydropower project[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2017, 33(1): 36 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 卢达. 基于赤平投影法的岩质边坡稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2010, 50(11): 69 – 71. [LU Da. Stability analysis of rock slope based on stereographic projection method[J]. Railway Engineering, 2010, 50(11): 69 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 龙海涛. 用CAD绘制赤平投影图进行边坡稳定性分析程序[J]. 南方国土资源, 2009(8): 35 – 36. [LONG Haitao. Program for slope stability analysis by drawing stereographic projection with CAD[J]. Nanfang Guotu Ziyuan, 2009(8): 35 – 36. (in Chinese)]
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)]
- [30] 董佳慧, 牛瑞卿, 亓梦茹, 等. InSAR技术和孕灾背景指标相结合的地灾隐患识别[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 187 – 196. [DONG Jiahui, NIU Ruiqing, QI Mengru, et al. Identification of geological hazards based on the combination of InSAR technology and disaster background indicators[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 187 – 196. (in Chinese with English abstract)]
- [31] FELL R, HO K K S, LACASSE S, et al. A framework for landslide risk assessment and management[C]// EBERHARDT E, HUNGR O, FELL R, et al. Landslide risk management. Vancouver: Taylor & Francis, 2005: 3 – 25.
- [32] 张奇华, 胡惠华, 张煜, 等. 块体稳定分析中传统赤平投影与全空间赤平投影对比研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1148 – 1155. [ZHANG Qihua, HU Huihua, ZHANG Yu, et al. Comparison of traditional and whole-space stereographic projections in block stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1148 – 1155. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 杜岩, 霍磊晨, 张洪达, 等. 岩块体崩塌灾害遥感监测预警试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1201 – 1208. [DU Yan, HUO Leichen, ZHANG Hongda, et al. Experimental study on remote sensing monitoring and early warning of rock block collapse disaster[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1201 – 1208. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 党杰, 董吉, 何松标, 等. 机载LiDAR与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 106 – 113. [DANG Jie, DONG Ji, HE Songbiao, et al. Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 许强, 朱星, 李为乐, 等. “天-空-地”协同滑坡监测技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1416 – 1436. [XU Qiang, ZHU Xing, LI Weile, et al. Technical progress of space-air-ground collaborative monitoring of landslide[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1416 – 1436. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. [Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)]

编辑: 王支农