引文格式：黄燕鹏,张策,孙永彬,等. 基于多源遥感的单体滑坡风险评价技术研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):73-77. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.016

基于多源遥感的单体滑坡风险评价技术研究

黄燕鹏[1,2]，张　策[1,2]，孙永彬[1,2]，李启亮[1,2]
（1. 核工业航测遥感中心，河北 石家庄 050002；2. 河北省航空探测与遥感技术重点实验室，河北 石家庄 050002）

摘　要：针对典型单体滑坡，需要大量地面调查工作对其作出定量性的风险评价。遥感技术具有方便、快捷、时效性的特点，故而研究一种基于遥感数据的单体滑坡风险评价方法具有重要意义。以易门县沙河村滑坡为例，通过无人机光学遥感数据、InSAR 形变数据开展调查，分析滑坡发育及形变特征，并根据获得的高精度地表模型，利用三维数值模拟，结合研究区承灾体分布情况，对滑坡进行地质灾害风险评价。研究结果表明：滑坡区呈现三级台阶地貌特征，后缘及中部分布大量拉张裂缝，发育多个次级滑坡，主要形变部位位于滑坡体中部台坎区及玉楚高速隧道口切坡区域。滑坡区在不同工况条件下风险总值均远高于易门县滑坡平均财产损失，风险性为高风险，与核查结果一致。结果表明，利用上述方法对单体滑坡进行风险评价具有一定的科学性和可应用性，可为后续相关研究提供参考。

关键词：多源遥感；单体滑坡；风险评价；易门县
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0073-05

Research on Single Landslide Risk Evaluation Technology Based on Multi-source Remote Sensing

HUANG Yanpeng[1,2], ZHANG Ce[1,2], SUN Yongbin[1,2], LI Qiliang[1,2]
(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China;
2. Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: For the typical single landslide, a lot of ground investigation is needed to make quantitative risk evaluation. Remote sensing technology has the characteristics of convenience, rapid and timeliness, so it is of great significance to study a single landslide risk evaluation method based on remote sensing data. Taking the landslide in Shahe Village, Yimen County as an example, we used UAV optical remote sensing data and InSAR deformation data to conduct the survey, and analyzed the landslide development and deformation characteristics. Based on the obtained high-precision surface model, we conducted a geological disaster risk evaluation of the landslide by using 3D numerical simulation and in combination with the distribution of disaster carriers in the research area. The research results show that the landslide area presents the landform features of three steps, a large number of tensile cracks are distributed in the rear edge and the middle, and several secondary landslides are developed. The main deformation parts are located in the steps area of landslide and the cutting slope area of the Yu-Chu expressway tunnel entrance. Under different working conditions, the total risk value of study area is much higher than the average property loss of landslide in Yimen County, and the risk is extremely high risk, which is consistent with the verification results. The verification results show that the above methods for risk evaluation of single landslide is scientific and applicable, which can provide reference for subsequent related studies.

Key words: multi-source remote sensing, single landslide, risk evaluation, Yimen County

遥感技术在区域性地质灾害风险评价上有着效率高、应用广等独特的优势[1-5]，但在单体地质灾害风险评价方面尚还需要结合地面基础调查等资料进行综合研究，特别是如何选取遥感相关评价因子既可以保证一定的精度又能够减少地面调查的工作量，这是当前应用多源遥感数据对单体地质灾害进行风险评价需要解决的问题[6-12]。

本文以易门县沙河村滑坡为例，通过无人机光学遥感数据、InSAR形变数据开展调查，分析滑坡发育及形变特征，并根据获得的高精度地表模型，利用三维数值模拟，结合研究区承灾体分布情况，对滑坡进行地质灾害风险评价，为防灾减灾提供建议，也为相关典型单体滑坡风险评价研究提供参考。

1　研究区概况

沙河村滑坡位于云南省玉溪市易门县铜厂彝族乡，区内高程 1 631~1 984 m，属侵蚀中山地貌，总体地势呈现东高西低的地形特征。滑坡后缘及中部出

项目来源：云南省地勘基金资助项目（YNGH[2021]-055/1 标段）。
第一作者简介：黄燕鹏（1996—），硕士，工程师，主要从事地质灾害调查评价相关工作，E-mail：15733172137@163.com。

现大量拉张裂缝，对坡体中部居民区及下方玉楚高速形成较大威胁，研究区全貌如图1所示。据现场调查，沙河村滑坡隐患地表形变开始于2018年，坡体局部区域地表发生蠕动，出现大量拉张裂缝，稳定性较差，再次发生滑动的可能性较大，地质灾害风险较高。

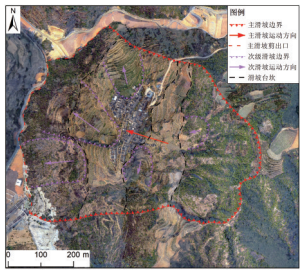


图1 研究区全貌图

2 研究方法

2.1 滑坡发育特征识别

通过无人机正射及倾斜摄影，获取研究区的正射影像及三维实景模型，识别滑坡发育特征、承灾体类型及分布特征。选择了CW-15复合翼垂直起降无人机、搭载五拼倾斜相机JR503进行数据获取，时间段为2023年3月，经过空中三角测量、数字正射、倾斜数据制作、DEM生产等数据处理步骤后获得研究区的高精度遥感数据。

2.2 InSAR形变提取

为了能够反映最新的地表形变信息特征，且能够满足时序合成孔径雷达干涉测量技术的精度需求，本次InSAR地表形变信息提取主要采用了Sentinel-1A（简称哨兵1A）地球观测卫星。主要采用小基线集（SBAS-InSAR）时序形变监测技术，通过多幅解缠图的线性叠加获取监测时间段内的地表形变数据。本文使用数据时间为2019—2020年。

2.3 地表模型建立

利用无人机摄影测量数据，获取研究区高精度地形数据，为后续的数值模拟分析提供基础的地表模型（图2）。

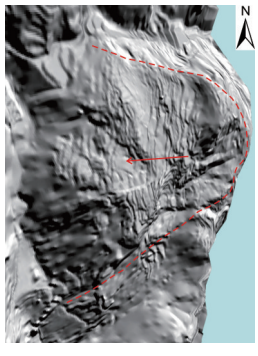


图2 研究区地表模型

2.4 数值模拟分析

本次主要采用数值模拟方法，建立滑坡隐患物理模型，采用强度折减法结合数值模拟[13]，准确模拟出岩土体的位移、应力、塑性区等，得到滑坡的安全系数，再根据滑坡安全系数与失稳概率的关系[14]，得到滑坡的破坏概率。

2.5 单体滑坡隐患风险评价方法

本文按照风险基本定义从单体滑坡隐患的危险性、承灾体易损性及承灾体价值三方面开展单体滑坡隐患风险分析[15]，所采用的具体表达式如下：

$$R=\mathrm{H}\times\mathrm{V}\times\mathrm{E}$$

式中，R为滑坡隐患风险；H为滑坡隐患危险性；V为承灾体易损性；E为承灾体经济价值或人口数量。

2.5.1 滑坡风险调查评价因子选择

考虑到本次无人机摄影测量获取的高精度数字高程模型（DEM）、正射遥感影像（DOM）、实景三维模型，以及InSAR地表形变数据的实际获取能力，本次危险性评价选取高程、坡度、工程地质岩组、构造距离、水系距离等地质环境因子，滑坡类型、滑坡形态、滑坡规模、变形特征等滑坡基本要素，水库水位、降雨、地震活动、人类工程活动等诱发因素作为危险性评价因子；易损性评价主要选择人口易损性、建筑物、交通设施、重要工程、土地资源等评价因子。

2.5.2 滑坡危险性评价

根据滑坡所处位置自然条件选择相应参数，由于沙河村滑坡雨季雨量充沛，受到地震影响较小，故本文主要分析滑坡位于自然和暴雨工况下的稳定性。计算所采用参数包括容重、泊松比、内摩擦角、粘聚力、弹性模量等岩土体物理力学参数，本次所用参数为研究区及邻区经验参数代表实际参数。

利用力学参数模拟，可得到滑坡所在边坡的稳定性系数。稳定性等级划分：稳定系数Fs>1.25为稳定，1.25Fs>1.05为基本稳定，1.05Fs>1.0为欠稳定，Fs<1.0为不稳定[16]。根据稳定性与破坏概率的关系，一般认为破坏概率P<30%为稳定，60%>P>30%为基本稳定，80%>P>60%稳定性较差，P>80%稳定性差[17]。

2.5.3 滑坡承灾体易损性评价

依据InSAR形变、光学遥感影像、无人机实景三维模型，圈定滑坡区域主要受影响范围，基于该范围内承灾体的类型及分布等特征，结合前人相关研究，选定不同承灾体类型的脆弱性评价指标，对滑坡承灾体易损性进行评价。

承灾体的获取主要采用室内遥感解译、野外调查

及区域基础地理数据相结合的方式，本文总共将其分为五类，主要包括人、建筑物、交通设施、重要工程、土地资源。承灾体遭受危害后所出现的破坏表现千差万别，在本次风险评价过程中，为了规范和统计承灾体抗灾程度，根据地质灾害风险调查评价技术要求（1∶50 000）“M.2重点调查区承灾体易损性赋值建议表”（表1）构建承灾体的易损性分级标准和赋值标准。

表1　承灾体脆弱性赋值

承灾体类型	评价指标	权重	分级	赋值
人口	人口密度（人/m²）	0.8	≥0.2	0.8~1.0
			0.03~0.20	0.5~0.8
			<0.03	0.3~0.5
	年龄结构（中青年：幼老年）	0.2	<1	0.7~1.0
			1~3	0.5~0.7
			≥3	0.3~0.5
建筑物	结构类型	0.5	钢结构	0.8~1.0
			钢混	0.7~0.8
			砖混	0.4~0.7
			砖木	0.3~0.4
			土木	0.1~0.3
交通设施	设施类型	1	高速公路	0.8~0.9
			国家级公路	0.5~0.8
			省级公路	0.3~0.5
			城市道路	0.2~0.3
			一般公路	0.1~0.3
			高速铁路	0.8~1.0
			城市路面轨道	0.7~0.9
			轻轨	0.6~0.8
			一般铁路	0.3~0.6
			地铁	0.3~0.5
重要工程	工程类型	1	油气线路	0.8~1.0
			输水线路	0.4~0.7
			输电线路	0.4~0.7
			通讯线路	0.3~0.6

3　沙河村滑坡的综合遥感特征

3.1　滑坡无人机光学遥感、InSAR形变特征

依据无人机高精度正射影像数据，对滑坡体开展了精细化解译（图1）。滑坡体长约721 m，宽约500 m，面积约321 155 m²。整体呈簸箕型，具有明显的二级台阶状地貌特征；滑坡体前缘发育3处后缘呈半弧形状次级滑坡，滑动方向基本与主滑坡方向保持一致；滑坡体中部（村庄右侧）存在一处明显的负地形，后缘呈弧形，为一小型已发生滑坡；滑坡体后缘坡体陡峭，坡度大于40°，发育1处小型滑坡，已发生多次小型滑动，稳定性较差，再次发生滑坡可能性较大，考虑到其距离下方村庄较远，且相对高程较大，认为其为高位远程滑坡。从坡体形态可以看出，沙河村滑坡为古滑坡特征较为明显，既具有坡体呈台阶状，滑坡台阶宽大且已夷平，线状冲沟较为发育。古滑坡体内分布有5处较明显次级滑坡，后缘多呈半弧形陡崖、陡坎，与相邻区域相比，呈明显的负地形。滑坡体主要威胁坡体中部村庄、耕地及下方玉楚高速公路。

InSAR提取结果表明，该滑坡所在地表形变反映明显，呈不规则形，形变区面积289 468.93 m²，长719 m，宽561 m，平均形变速率为−13.3 mm·a⁻¹，最大形变速率达−31.7 mm·a⁻¹。将滑坡体所在区域的光学遥感影像、InSAR地表形变进行叠加，结合数字高程模型（DEM）建立三维模型，可看出形变主要位于滑坡体中部台坎区及玉楚高速隧道口切坡区域（图3）。

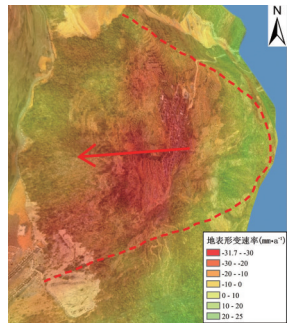
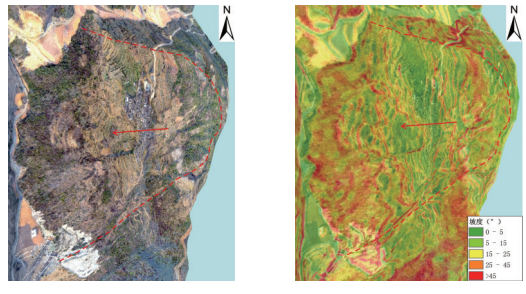


图3　沙河村滑坡隐患光学影像、InSAR地表形变叠合三维模型图

3.2　易门县沙河村滑坡三维实景模型特征

据无人机实景三维模型（图1），滑坡所在斜坡整体呈簸箕型，表现为台阶状，坡面不平整，整体呈凹面型；后缘为高陡边坡，坡度大于40°，坡顶基岩裸露；中部地形较缓，坡度约15°，为居民区和耕地区；前缘坡度变陡，坡度20~30°。坡体平台及下部形成3处后缘呈半弧形次级滑坡，滑动方向基本与主滑坡方向保持一致（图1）。从实景三维模型与坡度叠加图可以看出，滑坡体内部次级滑坡发育区域，为明显的负地形，滑坡后壁坡度明显变陡，并呈弧形展布如图4所示。



a 沙河村滑坡三维影像　b 沙河村滑坡三维影像–坡度叠加图

图4　沙河村滑坡实景三维模型图

通过易门县沙河村滑坡的无人机光学遥感、InSAR形变及实景三维模型等特征进行分析，结果表明沙河村滑坡边界明显、次级滑坡发育、年形变速率较

大、对承灾体造成严重威胁，整体风险性初步判定为高风险。在此基础上，对其进行定量化的风险性评价，对该地区防灾减灾提供一定的参考。

4 风险评价结果分析

在对易门县沙河村滑坡无人机光学遥感、InSAR形变及实景三维模型特征等分析结果的基础上，从滑坡危险性、易损性和风险性3个方面进行沙河村滑坡定量化风险评价研究。

4.1 危险性分析

以沙河村滑坡所处斜坡为研究背景，建立三维地质模型，分析边坡天然状态及饱和状态的力学规律，以分析稳定性及危险性。

4.1.1 模拟参数

沙河村滑坡岩土层采用软件内置mohr-coulomb本构模型模拟[18]，计算参数如表2所示。

表2 沙河村滑坡岩土体计算参数表

岩土类型	容重 rkN/m³	泊松比（μ）	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa	弹性模量E/（MPa）
黏土（天然）	1 470	0.3	30	30	60
黏土（饱和）	1 520	0.3	28	28	60
基岩	2 750	0.2	45	15 000	150 000

4.1.2 结果分析

主要针对坡体中部居民点聚集处进行模拟，根据模拟结果可以得出，无论是天然工况还是饱和工况，坡体中部区域位移形变主要发生在中上部，在天然工况下位移在12.5~27.5 mm之间，最大位移达到34.4 mm；在饱和工况下位移在12.5~30.0 mm之间，在饱和工况下最大位移为37.7 mm。

通过对该滑坡进行模拟，发现该滑坡在天然工况下稳定系数为1.070，破坏概率为57%，基本稳定，在降雨工况下稳定系数为1.020，破坏概率为72%（表3），处于欠稳定状态。由图5可知，滑坡居民点上部在暴雨工况下形成了明显的塑性贯通区域，说明了该滑坡在暴雨状态下处于不稳定状态，结果与模拟所得稳定系数结果相吻合。

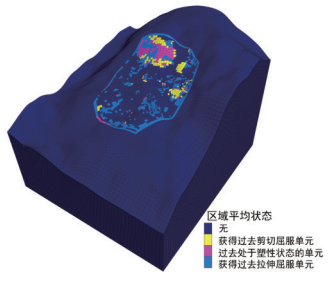


图5 沙河村滑坡暴雨工况塑性区分布图

表3 沙河村滑坡安全系数及破坏概率

滑坡名称	天然工况		饱和工况		参考值
	稳定系数 Fs	破坏概率 P	稳定系数 Fs	破坏概率 P	稳定系数 Fs
沙河村滑坡	1.070	0.570	1.020	0.720	1.250

4.2 易损性评价

根据无人机实景三维模型解译，沙河村滑坡范围内承灾体类型主要为农村宅基地、耕地、高速公路隧道及农村道路（图6）。其中，农村宅基地位于滑坡体中部，较为集中，房屋共28间，包括土坯结构3间，砖混结构25间；耕地分布面积较大，为166 209 m²；高速公路主要为玉楚高速隧道，全长约610 m；农村道路长度约135 m。滑坡体所在的沙河村人口数据参考易门县人口统计数据（2022年），共25人，其中0~14岁为5人，15~59岁为18人，60岁及以上2人。

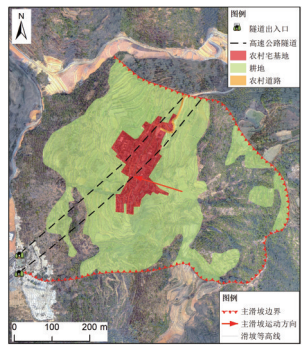


图6 滑坡承灾体分布图

4.3 滑坡风险评价

4.3.1 经济损失风险评价

通过对玉溪市易门县沙河村滑坡的稳定性和危险性进行分析可知，滑坡处于失稳阶段时，该滑坡上承灾体的经济损失为位于滑坡变形区的受到破坏的承灾体经济价值损失，可由承灾体价值与承灾体脆弱性值的乘积表示（表4）。在天然工况下，沙河村滑坡稳定系数为1.070，破坏概率为57%，对应风险总值为685.05万元；在降雨工况下稳定系数为1.020，破坏概率为72%，对应风险总值为865.33万元。

表4 玉溪市易门县沙河村滑坡风险总值统计表

承灾体类型	承灾体损失价值/万元	风险总值（$H\times V\times E$）		所在县滑坡平均财产损失/万元
		天然工况	饱和工况	
沙河村滑坡	1 201.85	685.05	865.33	221.74

4.3.2 风险可接受水平的判定

由于风险可接受水平的标准大多是根据人员伤亡情况进行界定，对于经济损失情况尚无确定标准[19]，所以本文以县域滑坡平均财产损失为依据，高于各县平均财产损失水平的即认为高于风险可接受水平，需

要进行进一步治理。

易门县滑坡地质灾害平均威胁财产221.74万元，平均威胁人数43人。易门沙河村滑坡风险总值天然工况下为685.05万元，威胁人数为25人，饱和工况下风险总值为865.33万元，风险值均远高于易门县域平均水平，需要采取一定措施缓解风险，或对滑坡进行预警预报，避免灾害发生时的人员生命及财产损失。

针对本次风险评价结果核查，主要采用与地面调查风险评价结果进行对比的方式开展。依据地面调查结果，易门沙河村滑坡地面及房屋地面形成拉张裂缝，地表发生蠕动变形，现状不稳定，威胁坡体中部居民、耕地、下方高速公路，总体风险程度确定为高风险，本次对沙河村滑坡评定的风险等级与地面调查风险评价结果一致。

5 结　语

本研究利用无人机与InSAR技术获取沙河村滑坡发育及形变特征，结合数值模拟进行风险评价。结果表明：滑坡体规模大、地形陡峭，地表形变明显；天然与饱和工况下风险值分别为685.05万元和865.33万元，远超当地平均水平，属高风险等级，与实地核查一致。该方法可为单体滑坡风险评价提供科学参考。

参考文献

[1] 铁永波,葛华,高延超,等. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望[J]. 沉积与特提斯地质,2022,42(4):653-665

[2] 周琪. 基于数值模拟的单体滑坡定量风险评价研究[D]. 成都:成都理工大学,2021

[3] 刘东飞. 白龙江流域单体滑坡隐患风险评价方法研究[D]. 兰州:兰州大学,2016

[4] 王日标,张剑波,谭辉善. 地质灾害风险评价指标体系构建研究[J]. 南方国土资源,2017,180(12):33-36

[5] 张东辉. 采用GIS和RS技术研究单体滑坡隐患风险评估模型[D]. 成都:成都理工大学,2010

[6] 谢全敏,刘鹏,夏元友. 滑坡灾害风险评价研究[J]. 金属矿山,2004,34(3):58-61

[7] 彭满华,张海顺,唐祥达. 滑坡地质灾害风险分析方法[J]. 岩土工程技术,2001,15(4):235-240

[8] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽. 基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价:以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):797-808

[9] 殷坤龙,陈丽霞,张桂荣. 区域滑坡灾害预测预警与风险评价[J]. 地学前缘,2007,14(6):85-97

[10] 贾俊,李志忠,郭小鹏,等. 多源遥感技术在降雨诱发勉县地质灾害调查中的应用[J]. 西北地质,2023,56(3):268-280

[11] 魏以宽,闵天,邹崇尧,等. 基于InSAR的武汉地区2016—2021年地面沉降监测[J]. 地理空间信息,2023,21(10):69-72

[12] 褚宁,米川. 一种基于无人机倾斜摄影的高精度单体三维建模方法[J]. 地理空间信息,2023,21(11):9-14

[13] 蒋韬,刘岁海,王知雄,等. 基于FLAC 3D的云南省沙坝村滑坡稳定性分析[J]. 水利水电快报,2024,45(7):35-40

[14] 张成航,王佳运,高波,等. 陕西胥家村黄土滑坡风险定量分析[J]. 地质通报,2015,34(11):2 138-2 142

[15] United N. Risk Awareness and Assessment in Living with Risk[M]. Isdr,Un,Wmo and Asian Disaster Reduction Centre,Geneva,2002,39-78

[16] 赵永辉,涂国祥,董劲,等. 基于FLAC3D的澜沧江古水水电站争岗滑坡堆积体稳定性分析[J]. 路基工程,2016,7(1):182-185

[17] 刘亦航. 红岩子滑坡稳定性分析及破坏概率计算[J]. 陕西水利,2019,11(6):42-43

[18] Charlis W N,Martin L L. Effects of Modeling Moil Nonlinearity and Wall Installation on Back-analysis of Deep Excavation in Stiff Clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1995,12(10):687-695

[19] 曹颖. 单体滑坡灾害风险评价与预警预报[D]. 武汉:中国地质大学,2016

（上接第67页）

[8] 李若楠,李均力,李爽爽,等. 基于Sentinel-2的依连哈比尔尕冰川变化监测[J]. 干旱区研究,2024,41(6):940-950

[9] 李飞,李冰,闫慧,等. 草地遥感研究进展与展望[J]. 中国草地学报,2022,44(12):87-99

[10] 龙昶宇. 利用时序NDVI分析安徽省植被参数时空变化[J]. 地理空间信息,2024,22(5):88-92

[11] 胡晓娟,李霞,王讷. 八步沙林场防沙治沙区植被覆盖度时空演变分析[J]. 地理空间信息,2022,20(1):66-69

[12] 李海峰. 基于Landsat影像的NDVI与RVI反演结果实验与分析[J]. 地理空间信息,2021,19(7):75-77

[13] 李晓香,张文,孟令奎. 河南地区VIIRS NDVI与EVI特性对比与分析[J]. 地理空间信息,2019,17(1):16-19

[14] 王淑芳. 内蒙古乌拉盖河流域近20年植被覆盖变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2013

[15] 张殿岱,王雪梅,昝梅. 基于Landsat 8 OLI影像的渭-库绿洲植被地上生物量估算[J]. 草业学报,2021,30(11):1-12