

泸石高速公路地质灾害多源遥感识别与分析研究

雷开云¹, 袁飞云¹, 肖锋¹, 欧阳群², 董秀军², 朱晓强², 廖泽源²

1. 四川泸石高速公路有限责任公司, 成都, 甘孜藏族自治州 626100;

2. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

摘要: 泸石高速公路沿大渡河修建, 在深切峡谷地形中穿梭, 工程地质条件复杂, 为川西一处典型山区高速公路。山区环境因植被茂密且地形起伏强烈, 导致传统的人工勘察手段难以发现、查明和评估灾害隐患区域。随着遥感技术的发展, 多源遥感手段给高位、高隐蔽性的地质灾害调查带来新的解决方案。研究综合应用 InSAR、机载 LiDAR、倾斜摄影测量等遥感技术, 针对泸石高速公路隧道进出口及明线段共 229.61 km² 的区域进行地质灾害多源遥感识别, 共识别出 117 处地质灾害隐患点。通过对比山体阴影图、SVF 图和 RRIM 识别出的灾害数量与面积, 发现 SVF 图和 RRIM 在灾害边界提取时的结果优于山体阴影图, 且 RRIM 在复杂山区具有更好的地形表达能力。分析结果表明, 该公路沿线的灾害主要集中在 1 000~1 500 m 高程处、60°~70° 的坡度段和北-东向坡向。

关键词: 泸石高速; 山区高速公路; 地质灾害; 多源遥感; 早期识别

中图分类号: P642; P694; X87 **文献标识码:** A

Research on Multi-Source Remote Sensing Identification and Analysis of Geological Disasters on Lushi Expressway

LEI Kaiyun¹, YUAN Feiyun¹, XIAO Feng¹, OUYANG Qun²,

DONG Xiujun², ZHU Xiaoliang², LIAO Zeyuan²

1. Sichuan Lushi Expressway Co., Ltd, Ganzi 626100, China;

2. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geoenvironmental Protection of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The Lushi Expressway is built along the Dadu River, shuttling in the deep canyon terrain, and the engineering geological conditions are complex, which is a typical mountain expressway in western Sichuan. Due to the dense vegetation and strong undulation of the terrain, it is difficult to discover, identify and assess the disaster hazard area by traditional manual survey methods. With the development of remote sensing technology, multi-source remote sensing methods have brought new solutions to high-level and high-concealment geological hazard investigations. In this study, remote sensing technologies such as InSAR, airborne LiDAR, and oblique photogrammetry were comprehensively used to identify multi-source remote sensing of

收稿日期: 2024-07-09 改回日期: 2024-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072306)

第一作者: 雷开云(1972-), 男, 高级工程师, 从事公路工程研究。E-mail: 248610662@qq.com

引文格式: 雷开云, 袁飞云, 肖锋, 等. 泸石高速公路地质灾害多源遥感识别与分析研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(2): 62-72.

LEI Kaiyun, YUAN Feiyun, XIAO Feng, et al. Research on multi-source remote sensing identification and analysis of geological disasters on Lushi Expressway[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(2): 62-72.

geological hazards in an area of 229.61 km² at the entrance and exit of the Lushi Expressway tunnel and the open line section, and a total of 117 geological hazard hidden danger points were identified. By comparing the number and area of disasters identified by the hillshade map, SVF map and RRIM, it is found that the results of SVF map and RRIM are better than those of hillshade map when extracting disaster boundaries, and RRIM has better terrain expression ability in complex mountainous areas. The analysis results show that the disasters along the highway are mainly concentrated at the elevation of 1 000~1 500 m, the slope section of 60°~70° and the north-east slope direction.

Key words: Lushi Expressway; Mountain expressway; Geological disaster; Multi-source remote sensing; Early identification

0 引言

随着国家在基础设施建设方向的大力投资,高速公路的里程逐年增加。泸石高速沿线为典型的深切峡谷地形,此类地形特征为边坡高陡、地质灾害多发且隐蔽性强、灾害体往往位于高位。由于深切峡谷边坡地质灾害成因机制和发展演化过程极为复杂、隐蔽性强,对其判识和防治极为困难,因而其所引发的地质灾害对于山区公路的建设、施工和运营易造成严重危害。

遥感技术在地质灾害识别的应用逐渐广泛,尤其近年来随着卫星 InSAR 技术的发展与进步,大范围地面变形的掌控已成为现实。有研究表明,地质灾害隐患体存在正在变形或已出现变形的迹象^[1],且 70% 的隐患点位于高植被覆盖或人迹罕至区域,人工排查难以发现^[2]。而 InSAR 技术具有全天时、全天候、全覆盖获取地表大范围形变数据的优势,在广域识别及滑坡重大变形区的识别应用中较为有利^[3-4]。然而,InSAR 技术也具有一定的局限性,其无法找出已发生变形的隐患体,这就需要配合低空遥感手段来实现精细化解释译。

无人机倾斜摄影测量及机载 LiDAR 技术可以更为快捷、灵活、低成本地对局域地质灾害体进行观测,具有自动化程度高、数据生产周期短、精度高等特点^[5-6],因此可作为卫星遥感识别的重要补充与完善。此外机载 LiDAR 不仅能提供高分辨率、高精度的地形地貌影像,同时可通过多次回波技术穿透地植被,获取地表的真实高程信息^[7]。无人机倾斜摄影测量及机载 LiDAR 技术不仅能真实地反映地物情况,还可通过先进的定位技术,嵌入精确的地理信息、更丰富的影像信息,极大地扩充了地质灾害观测手段,从而实现从空天的角度对重大地质灾害潜在隐患的识别^[8]。

1 研究区概况

1.1 地理位置

本次研究是以泸石高速沿线为例开展。调查研究区域位于东经 102°08′~102°25′,北纬 29°11′~30°00′,调查面积共 229.61 km²。泸石高速属于四川省马尔康至石棉高速公路的泸定县至石棉县段落,高速路段全长 97 km(图 1)。该公路沿河谷穿行,经过地形起伏强烈且地质构造复杂的路段。



图 1 泸石高速范围及交通位置图

1.2 地质环境条件

泸定县境内地貌涵盖低山河谷、高山和特高山地区,而石棉县同样因为地处青藏高原横断山脉东缘,整体地势呈现出西南高、东北低的特点(图 2)。由于地势起伏强烈,本项目所研究的公路高程从最低 880 m 到最高 2 800 m,达到了近 2 000 m 高差。公路沿线在靠近大渡河支流的山间盆地和河谷地带的主要地貌类型为侵蚀堆积地貌。由于水流畅常年地侵蚀和切割作用,大渡河流域呈现“V”字型,导致河谷狭窄、水流湍急,从而难以形成大面积的流水堆积^[9]。

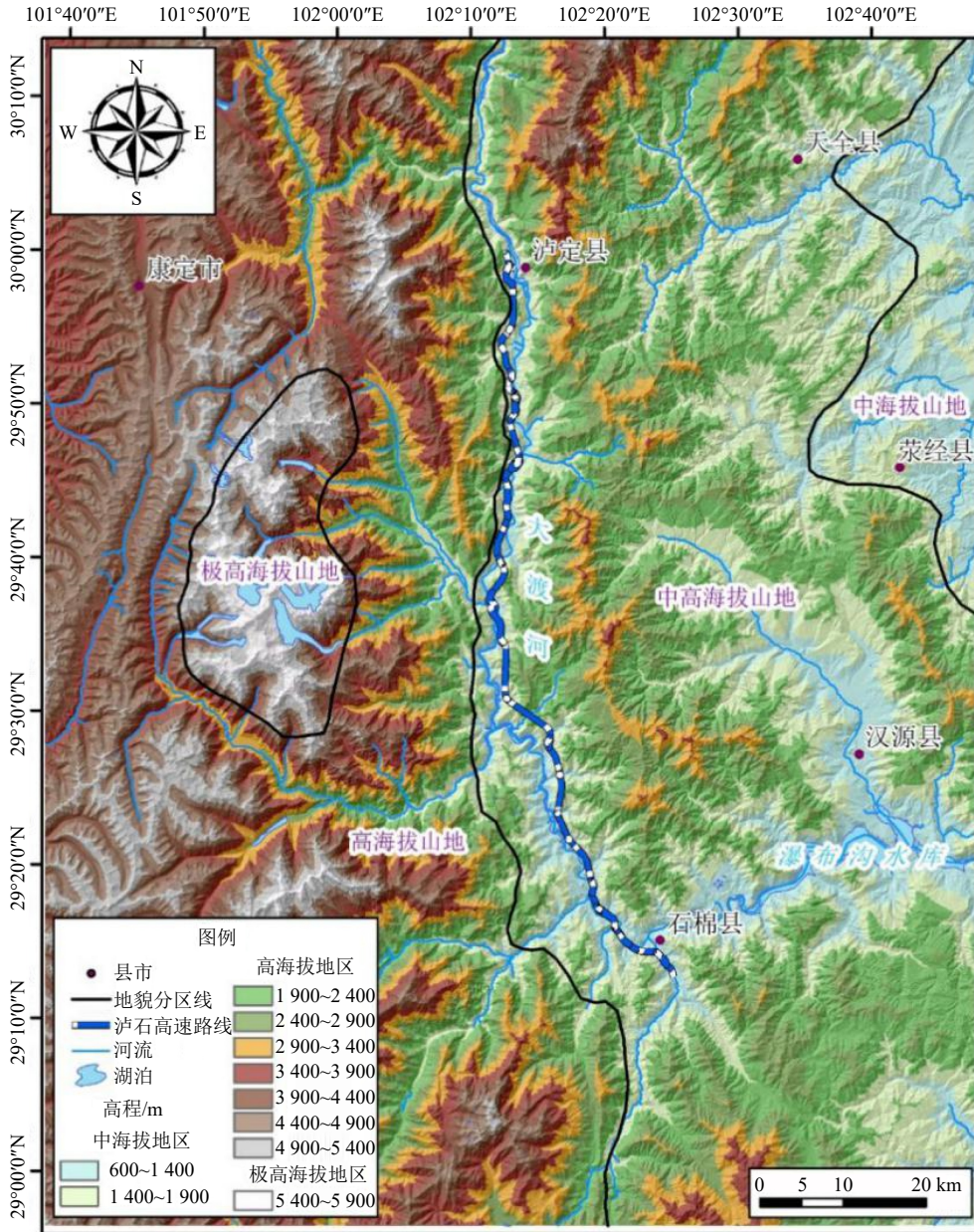


图2 泸石高速范围地形地貌图

通过收集区域地质相关文献^[10], 研究区域地层分区隶属于四川盆地龙门山分区二郎山小区, 区内地层以元古界岩浆侵入岩为主, 主要呈现为花岗岩、闪长岩与辉绿岩。局部段落出露有白云岩、砂岩、粉砂岩、页岩夹砂砾岩和煤层等。

已查明的泸石高速沿线断层分布图如图3所示, 泸石高速的大地构造部位属扬子准地台西部二级构造单元康滇地轴范畴^[11-12], 沿线上分布的断裂带主要有7条。在具体构造部位上, 泸石高速处于黄草山断块之上, 该断块被3条主要的断裂所切割, 分别是NNE向的大渡河断裂、NW向的金坪断裂和NNW向的磨西断裂。大渡河断裂又与泸定韧性剪切带交汇复合, 南北方向延伸, 直至与磨西断裂、

安宁河断裂相连。以泸定县境内高速路段为头, 以石棉县境内路段为尾, 整条公路穿过的主要断层就有4条, 包括头段交汇复合的大渡河断裂与泸定断裂、NE向的二郎山断裂和NW向跨越尾段的石棉断裂。

研究区较高海拔区域气候主要以高原大陆性季风气候为主, 表现为雨量偏少、雨热同季, 降雨主要集中在5~9月。而其他海拔在1800m以下的地区则表现为终年湿度较大且降雨量充沛的亚热带季风气候。根气象数据的调查研究, 泸定县境内冬无严寒, 夏无酷暑, 冬季平均气温7.5°C, 夏季平均气温22.7°C, 年均降雨量664.4mm; 石棉县降雨多集中于夏秋两季, 平均降雨量777.4mm。

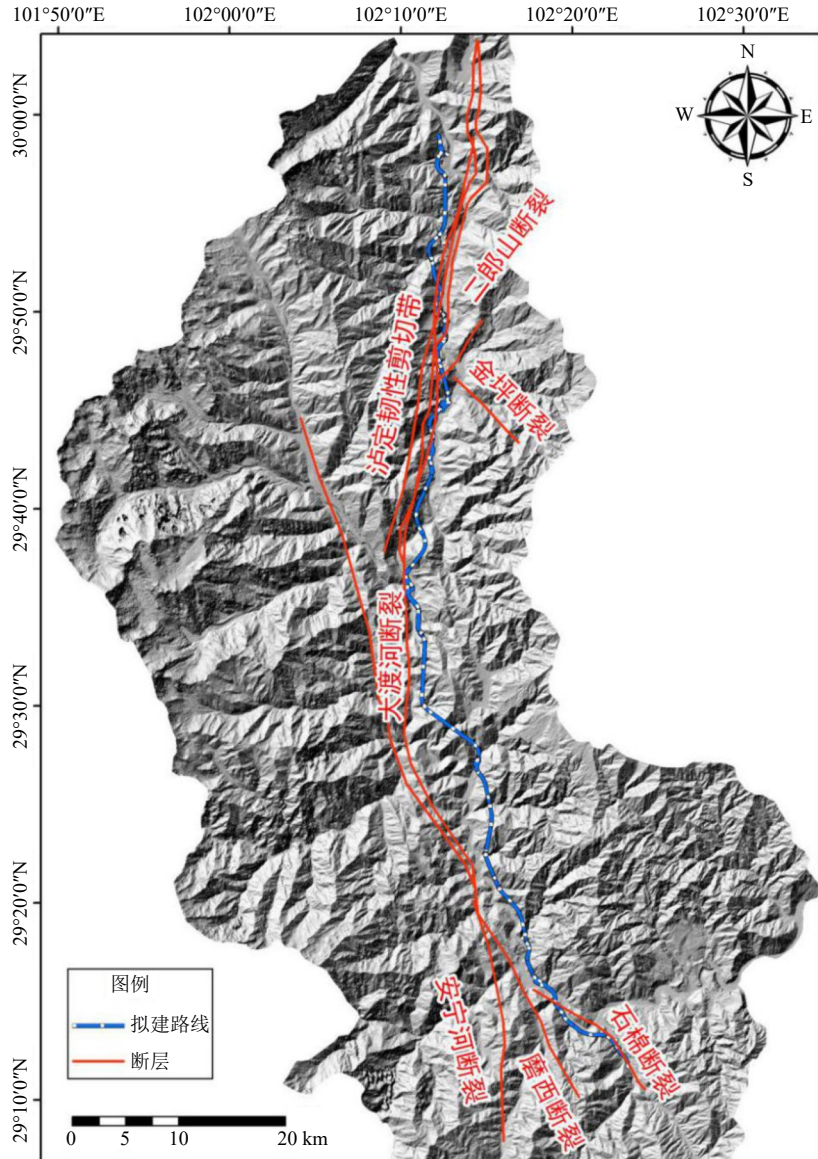


图 3 沪石高速沿线断层分布图

2 数据与方法

本次研究运用卫星 InSAR 技术和高精度光学遥感技术对整体区域进行地质灾害的普查,旨在筛选出重要隐患点;以无人机数字摄影测量和机载 LiDAR 技术作为详查手段,对地质灾害可能发生的区域进行快速的信息识别和图像捕捉,进而构建起灾害隐患区域的三维实景模型;以人工野外精细核查作为最终的检验步骤,进一步核实隐患点的边界、规模、形成机制、形变特征、演化阶段、稳定性状态、威胁范围等信息。

2.1 数据获取与处理

2.1.1 InSAR 数据获取与处理

本次研究所采用的 InSAR 数据来源于 Sentinel-1 雷达卫星,通过升轨和降轨联合进行 InSAR 分析,以

降低雷达观测和数据采集结果的叠掩、阴影、透视收缩等现象。本次降轨共 97 景,时间跨度为 2018 年 6 月 19 日至 2021 年 12 月 12 日;升轨共 212 景(两轨),时间跨度为 2018 年 6 月 12 日至 2021 年 12 月 17 日。分别对升轨和降轨数据进行 Stacking-InSAR 分析,获取长时间序列的干涉相位叠加图,初步识别出典型形变区。识别区域如图 4 所示,图中红色框为两幅升轨影像覆盖范围,蓝色框为降轨影像覆盖范围,黄色线为沪石高速路线。

2.1.2 机载 LiDAR 数据获取与处理

采用了飞马 D20 型无人机平台搭载 RIEGL VUX-11LR 激光雷达系统进行数据获取,该系统最大运行高度为 6 000 m,最大激光脉冲发射频率为 820 kHz,激光发散度为 0.5 mrad,最大有效测量速度为 750 000 点/s,扫描速度 200 次/s。主要飞行设计参数为:以飞

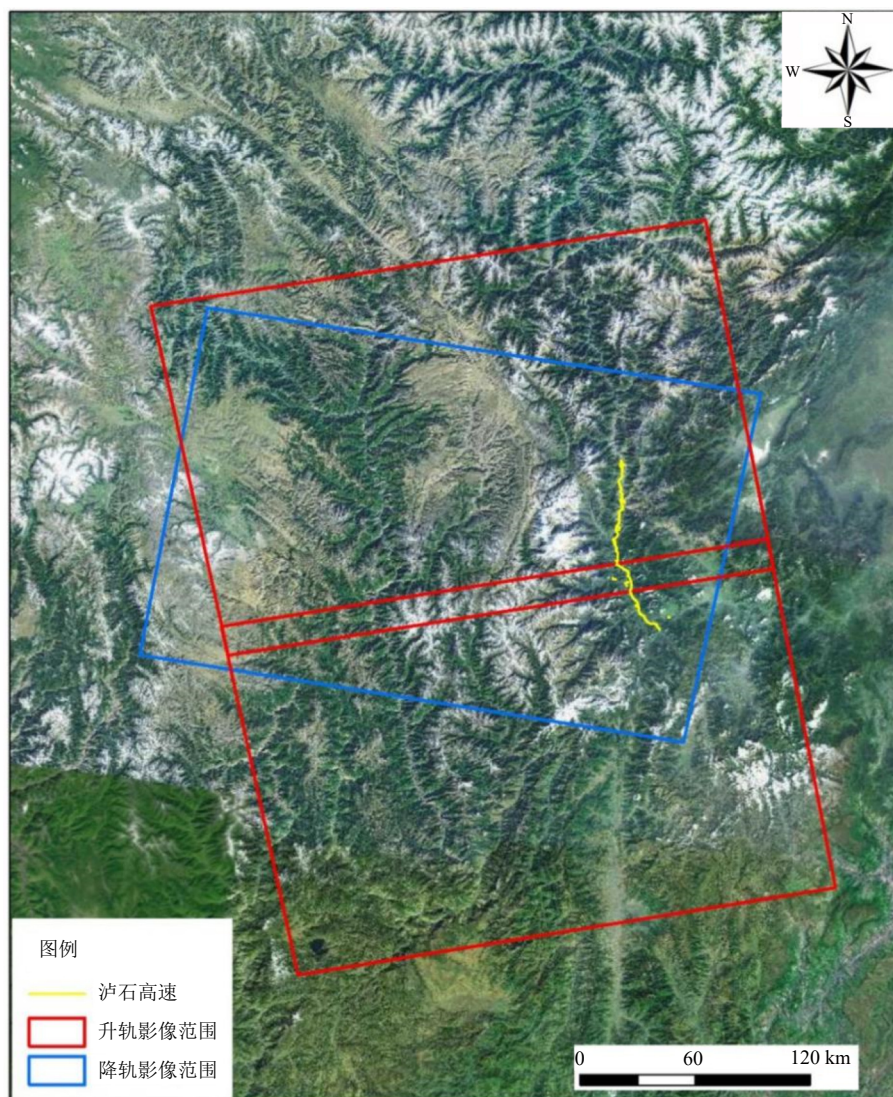


图 4 升降轨数据覆盖范围

马 D20 型无人机为航空遥感平台,相对航高为 600 m,飞行速度 18 m/s,航线数 20 条,激光扫描角 45°,航线重叠度 60%~70%,平均激光点密度 40 pts/m²。

对获取的点云数据进行解算、航带平差处理、去噪后,构网生产格网型数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM)。

2.1.3 倾斜摄影测量数据获取与处理

针对泸石高速公路沿线危岩的分布情况,采用 D20 无人机搭载 5 个不同方向的镜头,从多个方向获取潜在危岩的航片,制作生成三维实景模型。

2.2 识别方法

卫星 InSAR 技术主要用于找出泸石高速公路沿线近几年发生的大尺度变形区域,倾斜摄影测量技术主要用于隧道进出口及互通段的危岩识别与调查,机载 LiDAR 技术能够穿透植被,实现精细化解译,是泸石高速公路解译的主要手段。在数据获取

处理完成后,通过成都理工大学全国重点实验室、京创智慧科技有限公司、航维智星科技有限公司联合研发的 Earthsurvey 遥感解译一体化平台搭建解译环境、建立解译标志、校核解译结果的流程来进行地质灾害遥感识别。

其中,搭建解译环境中的 DEM 可视化方法和解译标志的构建直接影响隐患体的识别结果。

2.2.1 DEM 可视化方法

将 DEM 可视化为灰色图像或彩色影像来作为解译环境的基本图层,是识别研究区的潜在地质灾害必不可少的一环。不同可视化方法会影响地质灾害要素的识别精度,常用的可视化方法包括山体阴影图、天空视域因子(SVF)图、红色立体图(RRIM)。

(1) 山体阴影(Hillshade)

山体阴影图是最常用的可视化方法之一,由 Yoëli^[13] 提出并制定的标准被一直沿用至今。原理是

利用假想的太阳光在特定的角度对地面照射所产生的表面明暗程度的连续变化^[14],使地貌的分布、起伏和形态特征实现一种立体感增强显示。山体阴影的算法在现有的 GIS 基础上已能实现,如 ArcGIS 和 QGIS。

(2) 天空视域因子(SVF)

SVF 是一种基于漫反射的可视化方法^[15],其表示从某个点可见的天空部分(考虑以每个像素上方为中心的半球,忽略数学地平线以下的任何方向),具有以下几个特点:①由 SVF 可视化的要素不包含任何水平位移。②SVF 的范围在 0 到 1 之间。接近 1 的值表示像素上方的几乎整个半球都可见,如平面、山脊和山峰,而接近 0 的值则表示几乎看不到天空,如深坑和深谷的较低部分。③与山体阴影图像一样,SVF 图像具有直观的可读性。

SVF 的可视化效果受水平搜索半径和搜索方向的影响。研究表明,在空间分辨率一定的情况下,最优搜索半径为 25~50 m,搜索方向为 16 个^[16]。

(3) 红色立体图(RRIM)

RRIM(Red Relief Image Map)是 Chiba^[17]提出的一种 3D 可视化方法,其基本原理是由地形坡度

(slope)、正向开放(positive-openness)和负向开放(negative-openness)此 3 个因子图层融合而成。Yokoyama^[18]等人定义了正向开放和负向开放。正开度(O_p)等于各个方位的天顶角之和的平均值,负开度(O_n)则是基于最低点的平均角度。正值表示上凸,负值表示下凹。

脊谷指数 I 的计算如式(1):

$$I = \frac{O_p - O_n}{2} \quad (1)$$

在 RRIM 中,脊谷指数 I 用灰度图像层表示,地形坡度用红色层表示。但在实际操作中,RRIM 图层的生产较为繁琐,是 3 种可视化方法中成本最高的一种。

图 5 为路线附近一处滑坡的不同可视化方法对比图,可见 SVF 图和 RRIM 在保持基本地貌特征的同时,去除了山体阴影图中单一光源造成微小地貌特征被阴影遮蔽的影响,有助于在目视解译过程中直接从地貌上观察到滑坡的前后缘边界位置、滑坡台坎、鼓丘、冲沟等特征。SVF 图和 RRIM 在细节的增强方面强于山体阴影图,SVF 图具有更强的亮度与对比度,RRIM 则具有更高的清晰度。

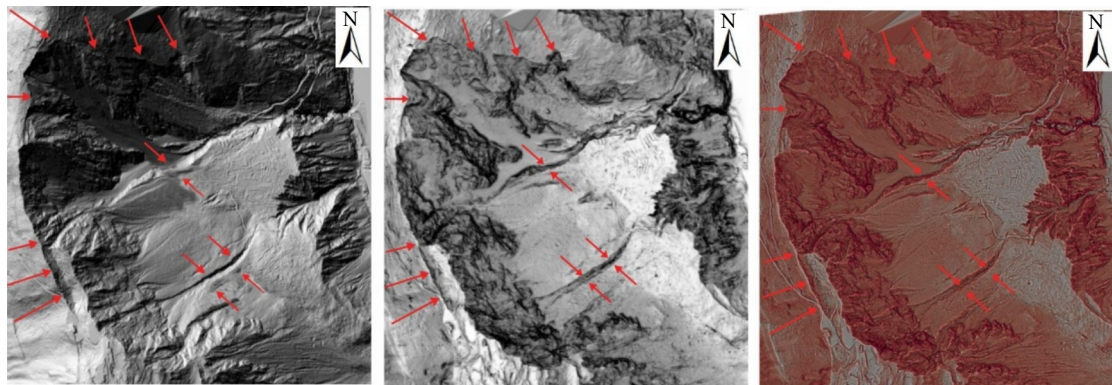


图 5 不同可视化方法下的同一古滑坡增强效果对比

为了避免结果的偶然性,解译人员对沪石高速全域数据都开展了判释工作,经过室内解译和野外校核验证(表 1),SVF 图和 RRIM 在灾害边界提取时的结果优于山体阴影图。SVF 图不受光源角度的影响,在总体保持地貌特征的同时,能较好地突出显示微地貌特征,适用于各类地形、场景下的解译工作;

表 1 不同可视化方法下的地质灾害判释结果对比

可视化方法	数据面积/km ²	灾害数量/个	灾害面积/km ²	灾害密度/%
人工调查		33	19.66	8.56
山体阴影	229.61	54	53.33	23.2
SVF		62	54.23	23.6
RRIM		75	56.15	24.4

RRIM 是地形开度生成的脊骨指数图和地形坡度图的产物,对于地形起伏强烈的区域,具有更好的识别效果。根据对研究区发育灾害的判释结果,结合研究区地形地貌条件,得出 RRIM 更适宜于沪石高速沿线的灾害判释工作。

2.2.2 遥感解译标志

(1) 滑坡

在此次的解译中,大部分滑坡形态相对不太完整,局部改造较多,部分改造主要发生在堆积体区域。如图 6 所示是研究区域中相对典型的滑坡形态。

图 6(a)是研究区内某滑坡的三维实景模型,从模型上看,疑似滑坡区域被植被遮蔽,形态特征基

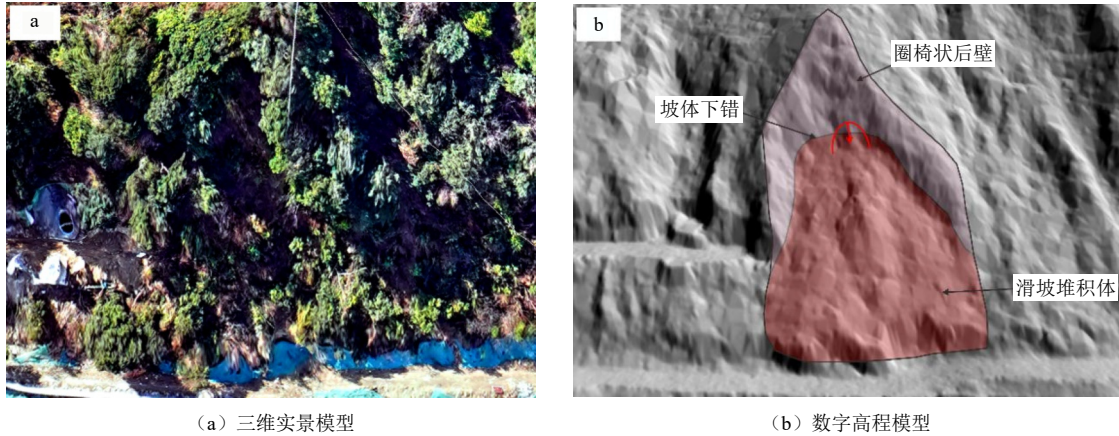


图6 研究区典型滑坡

本不可见;基于滤除植被处理后的点云数据,获取如图6(b)所示的数字高程模型,可见该潜在滑坡呈圈椅状形态,滑源区表面光滑、存在物质损失,堆积区边界地形变化、物质增加,这构成了研究区内滑坡判释的典型标志。

(2) 崩塌

研究区崩塌灾害多发育在地形陡峭之处。在

图7(a)所示的崩塌三维实景中可以看到崩塌坡体植被稀疏,崩塌后壁几乎直立,局部内凹,至堆积区临近道路,坡度变缓;在滤除了植被的数字高程模型图7(b)中,崩塌的后壁与堆积区坡度变化交界明显,很好地展示了崩塌的真实形态特征。图中崩塌壁呈深色调,可见基岩的结构特征;堆积体处于地形低处,主要呈三角锥形,色调较浅而均一。

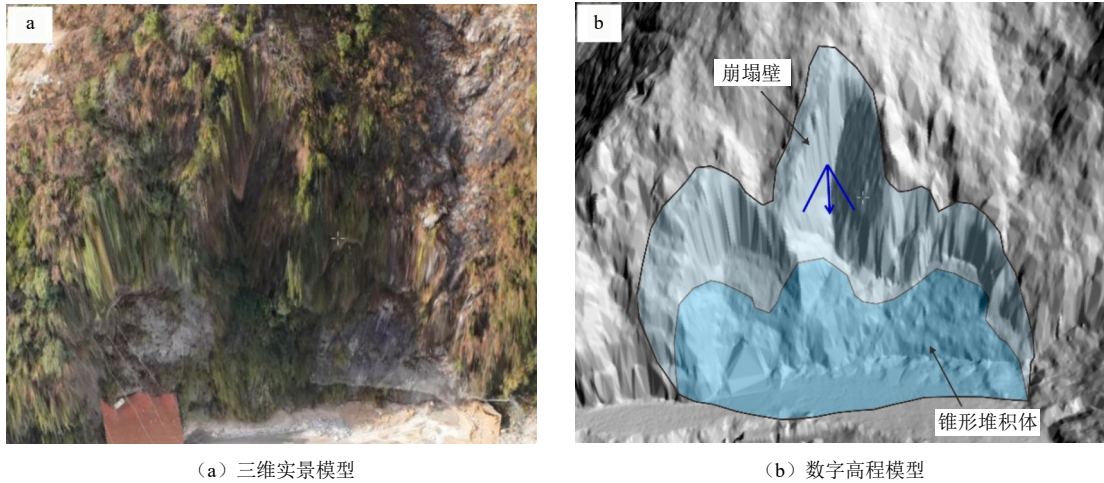


图7 研究区典型崩塌

(3) 泥石流

图8(a)为研究区内某典型泥石流的三维实景模型,从模型上看,泥石流区域边界基本不可见,其他形态特征均不明显;基于滤除植被处理后的点云数据,获得了如图8(b)所示的数字高程模型,平面形态为斗状,主要由物源区、流通区和堆积区组成,沟道长、坡度陡,是研究区内泥石流的典型判释标志。

LiDAR 数据开展解译与验证工作,通过 InSAR 识别出明显变形区域后,机载 LiDAR 识别出的隐患数量为 75 处(滑坡隐患 29 处、泥石流 11 条、崩塌或危岩 35 处),三维实景模型解译出崩塌或危岩 42 处,共计解译出 117 处隐患点。表 2 为公路沿线典型高位隐蔽性灾害体隐患野外查证情况。

3.2 灾害发育分布规律

坡度是影响边坡稳定性的重要因素之一^[19-20]。在 117 处地质灾害隐患点中,坡度在 30°~40°之间 6 处(滑坡 4 处、崩塌 1 处、泥石流 1 处),坡度在 40°~50°之间 10 处(滑坡 6 处、崩塌 3 处、泥石流 1 处),50°~60°之间有 32 处(滑坡 12 处、崩塌

3 结果与分析

3.1 灾害隐患识别结果

经由解译人员对全域共 229.61 km² 的机载

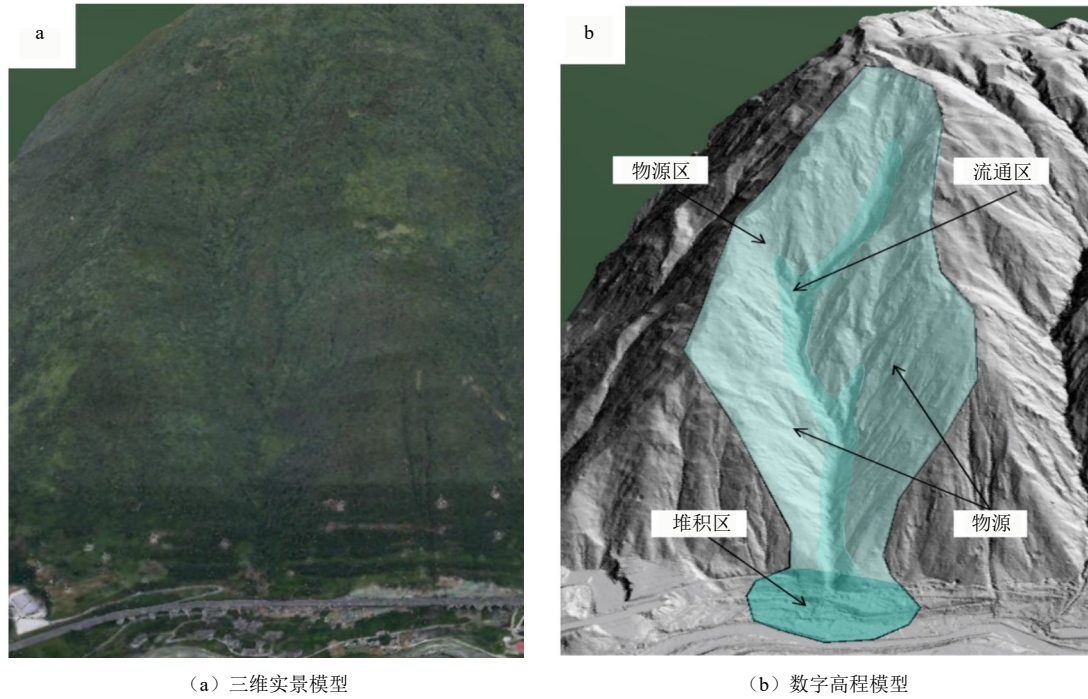


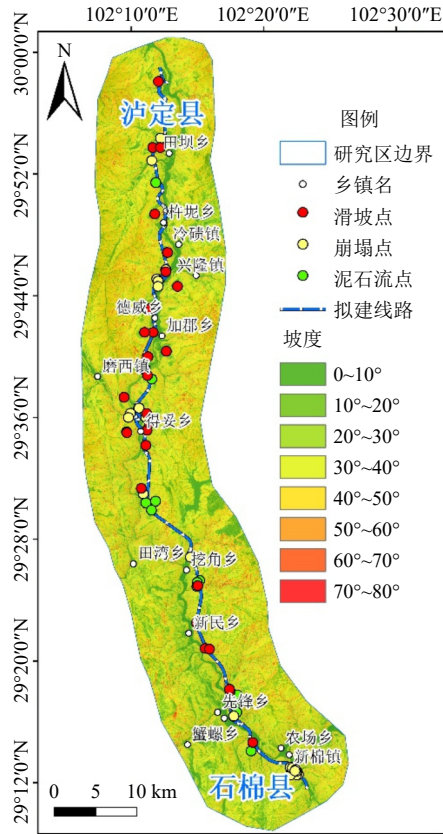
图8 研究区典型泥石流

表2 沪石高速公路沿线典型高位隐蔽性灾害隐患调查表

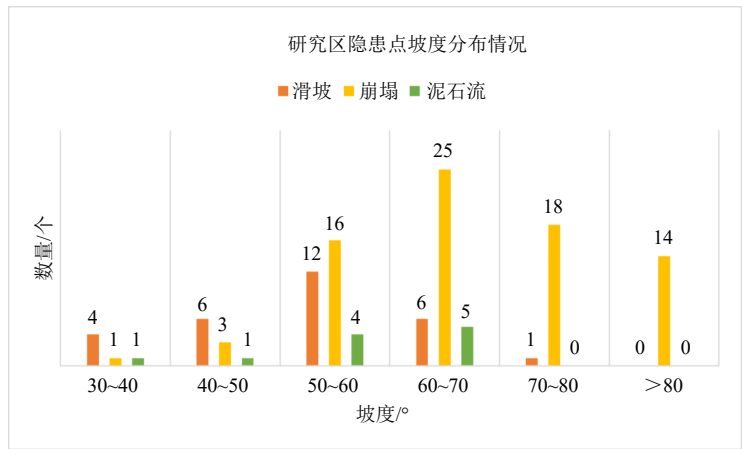
类型	三维实景模型	机载LiDAR影像	现场查证情况
滑坡			
崩塌			
泥石流			

16处、泥石流4处),坡度在达到60°~70°之间的灾害数量为36处(滑坡6处、崩塌25处、泥石流5处),70°~80°为19处(滑坡1处、崩塌18处、泥石流0处),>80°的有14处(滑坡0处、崩塌14处、泥石流0处),可见研究区内地质灾害隐患点集中分布在50°~70°之间,而崩塌灾害坡度在60°以上

57处(图9),占比达74%,这充分说明崩塌一般发育在坡度较陡的地带。根据调查,泸石高速公路沿线的崩塌灾害多集中分布于奎武隧道出口及大杉树互通段,这与奎武隧道出口的位置高度有关,其位于花岗岩中风化带,受河谷下切与风化剥蚀共同作用,因此具备形成崩塌灾害的基本条件。



(a) 研究区坡度图



(b) 隐患点坡度分布情况

图9 研究区灾害与坡度关系分布图

坡向不同导致的植被类型和植被覆盖度差异常常会影响到斜坡地质灾害的发生^[21]。通过GIS中的坡向工具,将坡向划分为北、东北、东、东南、南、西南、西和西北方向,叠加隐患点位置得到坡向与隐患点分布图(图10)。据统计,117处地质灾害隐患点中,有71处位于北-东向(滑坡12处、崩塌57处、泥石流2处),占总比的61%,为研究区内地质灾害主要发育坡向。

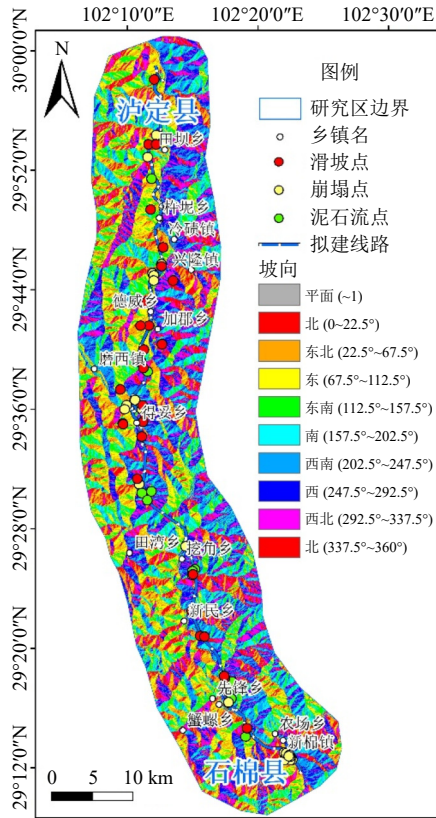
地质灾害的发育还会受到高程的影响。地形高差大的区域往往更容易发生滑坡、崩塌等地质灾害。公路沿线高程跨度大,范围在880~2800m内,在统计时将高程划分成<1000m、1000~1500m、1500~2000m、>2000m,然后将高程图与灾害点叠加分析得到高程与地质灾害点分布情况(图11),117处地灾隐患中有15处高程值<1000m,>1500m

的有29处,高程值在1000~1500m之间的多达73处(滑坡7处、崩塌62处、泥石流4处),占总比的62%,为公路沿线地质灾害的主要分布高程。

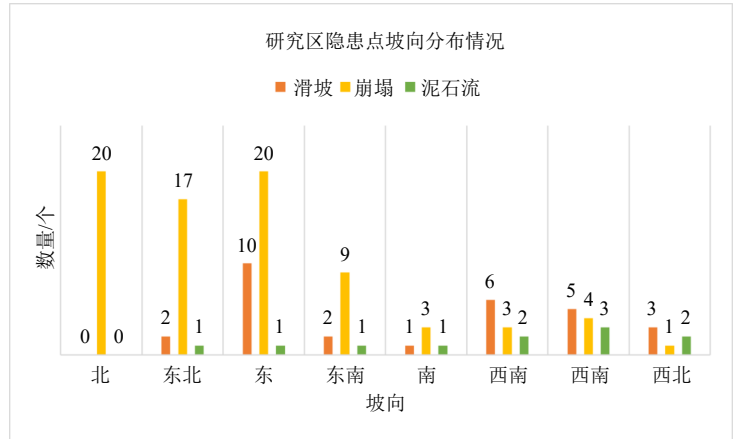
4 结论

针对泸石高速这一典型山区高速公路,选用InSAR、机载LiDAR、倾斜摄影测量相结合的多源遥感识别方法,查明公路沿线地质灾害发育分布特征,为公路的规划期、施工期和运营期的灾害防治工作提供了相关技术支撑。

通过对比选用RRIM在Earthsurvey软件中构建三维解译环境,建立泸石高速公路沿线典型崩塌、滑坡、泥石流的解译标志,在此基础上开展地质灾害判释工作。通过对多源遥感数据分析的综合判释,共

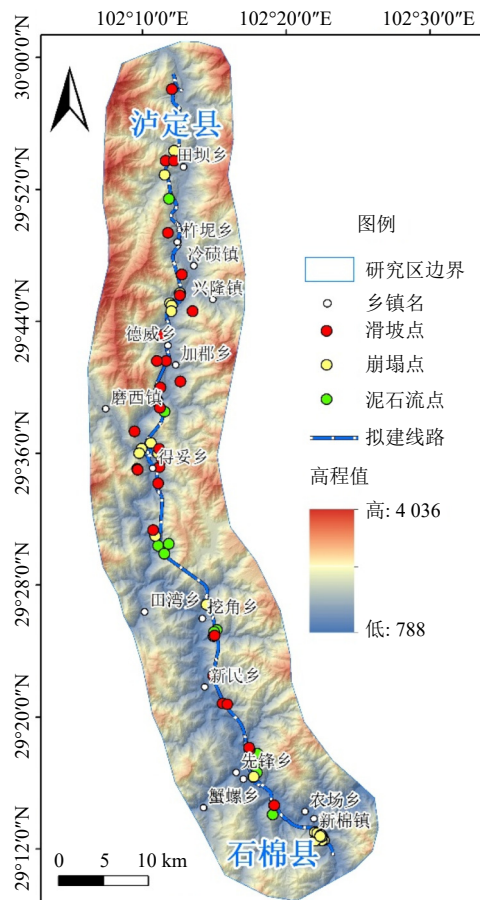


(a) 研究区坡向图

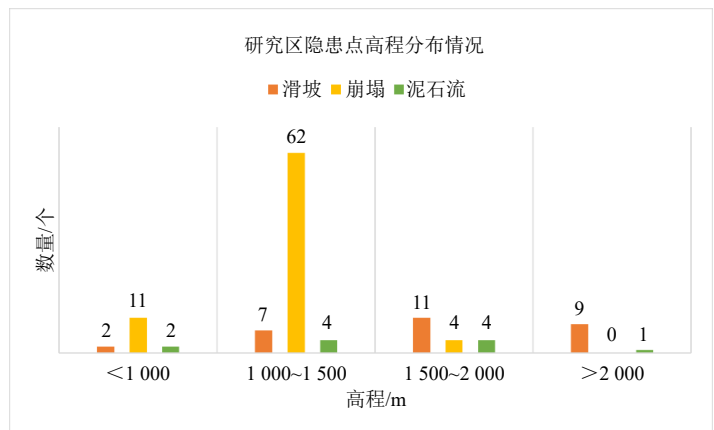


(b) 隐患点坡向分布情况

图 10 研究区灾害与坡向关系分布图



(a) 研究区高程图



(b) 隐患点高程分布情况

图 11 研究区灾害与高程关系分布图

计解译出 117 处隐患点。通过 InSAR 识别出明显变形区域后, 机载 LiDAR 识别出的隐患数量为 75 处(滑坡隐患 29 处、泥石流 11 条、崩塌或危岩 35 处), 三维实景模型解译出危岩 42 处, 补充了以往地面人工巡查过程中遗漏未发现的地质灾害。通过对灾害的发育分布规律研究, 结果表明研究区地质灾害的坡度分布集中于 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$; 坡向分布集中在北-东向; 高程分布集中于 1 000~1 500 m。这为泸石高速公路施工期安全建设提供了技术支撑, 也为其他山区高速公路的规划选线地质勘察工作提供了参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.
- [3] 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.
- [4] 侯峰. LIDAR 详细介绍及其应用举例综述 [J]. 科技广场, 2014, (4): 95-100.
- [5] 孙倩, 胡俊, 陈小红. 多时相 InSAR 技术及其在滑坡监测中的关键问题分析 [J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(3): 37-45.
- [6] 王燕燕, 于海洋. 基于倾斜摄影综合 SVM 与模糊规则的城市不透水面信息提取 [J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 20-26, 1-2.
- [7] 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.
- [8] 彭大雷. 黄土滑坡潜在隐患早期识别研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [9] 倪化勇, 李宗亮, 巴仁基, 等. 四川泸定县泥石流灾害成因、特征与防治建议 [J]. 工程地质学报, 2010, 18, (1): 91-99.
- [10] 王运生, 程万强, 刘江伟. 川藏铁路廊道泸定段地质灾害孕育过程及成灾机制 [J]. 地球科学, 2022, 47(3): 950-958.
- [11] 王运生, 苏毅, 冯卓, 等. 泸定韧性剪切带泸定段及其工程效应 [J]. 地球科学, 2022, 47(3): 794-802.
- [12] 王能峰. 水文地球化学在大岗山水电站坝区地下水系研究中的应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [13] YOÉLI P. Analytische schattierung: ein kartographischer versuch [M]. Deutschlarn Nachrichten, 1965, 15: 589-592.
- [14] HORN B K P. Hill shading and the reflectance map[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(1): 14-47.
- [15] ZAKŠEK K, OŠTIR K, KOKALJ Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique[J]. Remote sensing, 2011, 3(2): 398-415.
- [16] 郭晨, 许强, 董秀军, 等. 基于 SVF 地形可视化方法的滑坡识别——以四川省丹巴县城典型滑坡为例 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 705-713.
- [17] CHIBA T, KANETA S, SUZUKI Y. Red relief image map: new visualization method for three dimensional data[J]. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2008, 37(B2): 1071-1076.
- [18] YOKOYAMA R, SHIRASAWA M, PIKE R J. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models[J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 2002, 68(3): 257-266.
- [19] 罗国煜. 工程勘察中的新构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [20] 刘艳艳, 吴大放, 董玉祥, 等. 珠海市土地利用空间格局与地形的相关性研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 68-72, 2.
- [21] 张宇. 某气田集输管网地质灾害危险性评价及防治对策 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.