

## 西昌—香格里拉拟建高速公路廊道不良地质体遥感识别

周胜森, 李为乐, 陈俊伊, 蒋瑜阳, 王 毅

### Remote sensing detection of adverse geological bodies along Xichang-Shangri-La expressway

ZHOU Shengsen, LI Weile, CHEN Junyi, JIANG Yuyang, and WANG Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110011>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### “空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用——以兰州普兰太公司滑坡为例

Application of “Air-Space-Ground” integrated technology in early identification of landslide hidden danger: taking Lanzhou Pulantai Company Landslide as an example

侯燕军, 周小龙, 石鹏卿, 郭富 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 12-20

#### 香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 周文皎, 魏家旭 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 121-129

#### 基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析

An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: A case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River

刘文, 王猛, 朱赛楠, 余天彬, 黄细超, 宋班, 江煜, 孙渝江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 29-39

#### 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

#### 联合升降轨InSAR与高分辨率光学遥感的滑坡隐患早期识别

Early identification of hidden dangers of landslides based on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: A case study of landslides in Longde County, southern Ningxia

涂宽, 王文龙, 谌华, 李樵民, 耿丹, 王川, 郑健, 杨影 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 72-81

#### 基于GNSS技术的高速公路边坡自动化监测系统

Automatic monitoring system on highway slopes based on GNSS technique

王慧敏, 罗忠行, 肖映城, 刘正兴, 何安良, 梁晓东 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 60-68



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110011

周胜森, 李为乐, 陈俊伊, 等. 西昌—香格里拉拟建高速公路廊道不良地质体遥感识别 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 90-102.

ZHOU Shengsen, LI Weile, CHEN Junyi, *et al.* Remote sensing detection of adverse geological bodies along Xichang-Shangri-La expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 90-102.

## 西昌—香格里拉拟建高速公路廊道 不良地质体遥感识别

周胜森<sup>1</sup>, 李为乐<sup>1</sup>, 陈俊伊<sup>1</sup>, 蒋瑜阳<sup>2</sup>, 王 毅<sup>2</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**随着我国高速公路建设不断向西部山区发展,面临的崩塌、滑坡、泥石流等不良地质问题日益突出,迫切需要在选线阶段利用新的技术手段对拟建高速公路沿线不良地质体进行早期识别。以西昌—香格里拉拟建高速公路廊道为研究区,利用“天-空-地”一体化综合遥感手段,识别出不良地质体 174 处,其中滑坡 74 处、崩塌 40 处、泥石流 16 处、堆积体 44 处,利用小基线集合成孔径雷达干涉测量技术探测到 26 处不良地质体具有形变信号。针对磨盘山隧道—雅砻江桥段、牦牛山隧道出口段和下麦地隧道出口段不良地质体发育密集、规模大、稳定性差、对拟建线路威胁极大的区段,项目组开展了详细调查和分析评价。研究结果为西昌高速线路比选和后期详细勘查提供了支撑,也为线路工程不良地质体调查评价提供参考。

**关键词:**西昌—香格里拉高速公路;不良地质体;“天-空-地”综合遥感

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)06-0090-13

## Remote sensing detection of adverse geological bodies along Xichang-Shangri-La expressway

ZHOU Shengsen<sup>1</sup>, LI Weile<sup>1</sup>, CHEN Junyi<sup>1</sup>, JIANG Yuyang<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** With the development of expressway construction towards the western mountainous areas in China, the adverse geological problems such as collapse, landslide and debris flow are becoming increasingly serious. It is urgent to use new technical means to identify the adverse geological bodies along the proposed expressway in the early stage of route selection. the article applied the integrated remote sensing method of "Space-Air-Ground" to identified 174 adverse geological bodies, including 74 landslides, 40 collapses, 16 debris flows and 44 deposits along the proposed Xichang-shangri-La expressway. Applied small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar technique to detected 26 adverse geological bodies with deformation information. This article have carried out a detailed investigation and comprehensive evaluation on the section of Mopanshan tunnel - Yalong River bridge, the exit of Maoniushan tunnel, the exit of Xiamaidi tunnel where adverse geological

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2022-02-10

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC3000401); 国家自然科学基金(41941019); 空间信息应用与防灾减灾技术交通运输行业研发中心开放基金(KF-2020-001)

第一作者: 周胜森(1997-), 男, 陕西平利人, 硕士, 主要研究方向为地质灾害评价与预测。E-mail: 1305699624@qq.com

通讯作者: 李为乐(1982-), 男, 安徽太湖人, 教授, 主要研究方向为地质灾害早期识别与预测评价研究。E-mail: whylw101@163.com

bodies are densely developed, large in scale and poor in stability, posing great threat to the proposed line. The results provide support for routes comparison and later investigation of Xichang-Shangri-La expressway. It also provides reference for the investigation and estimate of adverse geological bodies along line engineering.

**Keywords:** Xichang-Shangri-La expressway; adverse geological bodies; the integrated remote sensing technology of space-air-ground

## 0 引言

山区高速公路虽然在选线阶段均开展了详细的地质灾害勘察工作,但由于地质灾害往往具有较强的隐蔽性,导致建设与运营期间高速公路沿线地质灾害事件频发。例如,2003年5月11日,贵州省三穗—凯里高速公路平溪特大桥3#墩附近发生滑坡,造成33人死亡,2人失踪,1人受伤,16间工棚被毁<sup>[1]</sup>。2004年12月13日,浙江省甬台温高速公路近 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的山体崩塌掩埋整个高速公路路面,致使高速公路大桥北白鹭屿至乐成镇一段封道近一周<sup>[2]</sup>。2014年10月10日,陕西省黄延高速扩能工程临时宿舍侧面山体滑塌,造成19人死亡<sup>[3]</sup>。2020年9月20日,四川省石棉县境内雅西高速姚河坝大桥右侧山体发生体积约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌,砸塌姚河坝大桥右幅两孔桥梁,造成全线交通中断<sup>[4]</sup>。因此,山区高速公路廊道不良地质体早期识别工作对于高速公路建设与运营意义重大。

早期的高速公路不良地质体识别工作多采用 LandSat-5、LandSat-7 等中低时空分辨率卫星影像与航空摄影结合的目视解译方法体系开展<sup>[5-9]</sup>。随着光学遥感影像分辨率提高, Ikonos、Quickbird、Worldview 等高分辨率卫星影像逐渐被应用于高速公路沿线不良地质体的识别工作<sup>[10-12]</sup>。同时,合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)、无人机摄影测量、机载激光雷达测量技术(Light laser Detection and Ranging, LiDAR)迅速发展为不良地质体遥感识别提供了有力的技术支撑。2017年四川省茂县新磨村滑坡发生后,许强等<sup>[13]</sup>提出基于星载平台“普查”(高分辨率光学+InSAR)、航空平台“详查”(机载 LiDAR+无人机摄影测量)、地面“核查”的“天-空-地”一体化地质灾害隐患早期识别“三查”技术体系。目前,自然资源部门已在我国中西部地质灾害易发区先后开展基于“三查”技术体系的地质灾害隐患早期识别,并取得良好效果<sup>[14]</sup>。同时,公路、铁路、水电等部门也逐步将“三查”技术体系推广应用到重点工程选址勘察工作中<sup>[15-19]</sup>。例如,2019年王天河<sup>[20]</sup>将“天-空-地”一体化综合遥感技术体系应用到高速公路不良地质体识

别中,为康定—炉霍高速公路线路优化提供了有益参考。但总的来说,目前“三查”技术体系在公路系统应用的广度和深度还不够。

西昌—香格里拉拟建高速公路(四川境,简称西香高速)位于四川省凉山彝族自治州,属典型的高山峡谷区,植被茂密,地质灾害具有较强的隐蔽性<sup>[21-23]</sup>。针对拟建西香高速廊道内的不良地质体,还未开展深入系统的早期识别工作,相关勘察和设计单位迫切希望查明西香高速沿线不良地质体空间分布和活动状况,以为高速公路拟选线路比选和优化提供支撑。

文中遵循地质灾害隐患早期识别“三查”技术体系,首先利用光学遥感解译和 InSAR 形变探测技术对西香高速公路廊道不良地质体进行大范围筛查,并结合野外调查验证和补充识别,查明不良地质体的空间分布特征,随后针对不良地质体集中发育并对拟选线路威胁大的典型区段,利用 SBAS-InSAR 技术和无人机航拍技术进行不良地质体详细调查和分析评价。

## 1 研究区概况

### 1.1 西香高速概况

西香高速由主线、泸沽湖支线、木里支线三部分组成,全长 218.33 km。主线起于西昌市,止点与云南境相连,总长约 165.40 km;泸沽湖延伸线起于主线关田坝处,止于泸沽湖东侧盖租乡,总长约 12.92 km;木里支线自棉坝枢纽互通接西香高速主线后向北布设,止于木里县,总长约 40.01 km<sup>[24]</sup>。根据拟选线路,可将主线分为 A、B、C 三个区段(图 1)。

### 1.2 工程地质概况

西香高速廊道位于四川省凉山彝族自治州,雅砻江流域中下游,地处滇西北横断山与云贵高原接壤地带,除安宁河谷、盐源盆地外,多为高山峡谷区。研究区位于青藏特提斯构造域与扬子大陆板块构造域之间,发育小金河—箐河断裂带、棉坝断层、霍儿坪断层、麦架坪断层、卧罗河断层及大量次生断层。区内地层岩性复杂,广泛分布二叠系、三叠系、侏罗系、新近系砂岩、泥岩、白云岩、灰岩、第四系堆积物和二叠系玄武岩,局部地区有红层出露。在构造活动和河流强烈切割作用

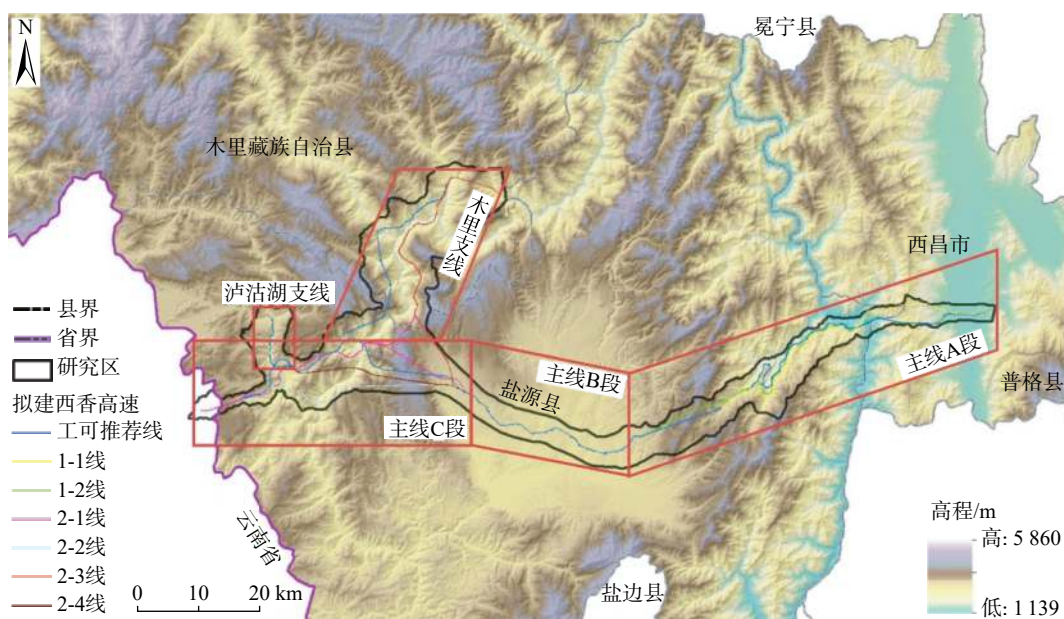


图 1 西香高速位置图

Fig. 1 Location of Xichang-Shangri-La expressway

下,区内地形高差较大、岩体节理裂隙发育,为崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害孕育提供了有利条件,导致该区域崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发<sup>[25-33]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源

此次不良地质体光学遥感识别,选取了 2011 年 12 月 25 日、2012 年 12 月 20 日、2015 年 2 月 28 日和 2019 年 8 月 12 日 GeoEye-1 卫星影像(分辨率 0.41 m)、天地图平台真彩色合成卫星影像(1.0 m),以及 2021 年 8 月 2 日高分一号影像(分辨率 2.0 m),所选影像云量均小于 10%。

针对研究区不良地质体形变探测,采用合成孔径雷达数据为哨兵 1 号 (Sentinel-1A) 卫星影像数据,为了尽量减少雷达影像几何畸变和叠掩误差导致的不良地质体漏判,同时选用 88 景升轨和 90 景降轨影像联合进行形变探测,升轨影像时间为 2020 年 1 月 9 日—2021 年 6 月 20 日,降轨影像时间为 2020 年 1 月 4 日—2021 年 6 月 27 日(图 2)。参考数字高程模型采用 SRTM DEM 数据(分辨率 30 m)。

### 2.2 不良地质体遥感识别

文中研究采用多时相光学影像目视解译与 SBAS-InSAR 时序形变探测相结合的方法对研究区不良地质体进行识别。首先利用前述 GeoEye-1、高分一号等多时相高精度光学卫星影像对拟选线路沿线不良地质体进行人工目视解译。在此基础上,基于 Sentinel-1A 雷

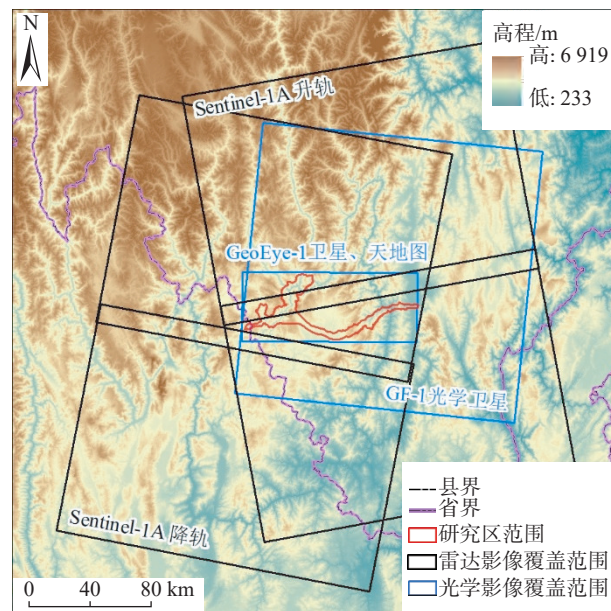


图 2 研究区光学和雷达影像覆盖范围

Fig. 2 Coverage of optical and radar satellite images

达卫星升降轨数据,利用 SBAS-InSAR 对拟选线路沿线不良地质体形变进行探测。

#### (1) 光学遥感识别

不良地质体的光学遥感识别主要是利用人工目视解译的方法,综合崩塌、滑坡、泥石流、堆积体等不良地质体的形态特征和宏观变形迹象进行识别<sup>[34-38]</sup>。研究区内各类不良地质体的光学遥感识别标志简述如下:

##### ① 崩塌识别标志

崩塌常发生在节理裂隙发育的坚硬岩石组成的陡

峻山体上, 主要从崩塌上部危岩体和下部堆积体进行综合识别。在高分辨率光学影像上, 崩塌上部危岩体一般呈浅色调, 纹理粗糙, 植被覆盖少, 可见拉张节理形成的

裂缝影像特征; 崩塌下部堆积在光学影像上呈表面坎坷不平、纹理粗糙、倒石堆状的影像特征, 有时可见散落巨大石块, 见图 3(a)。

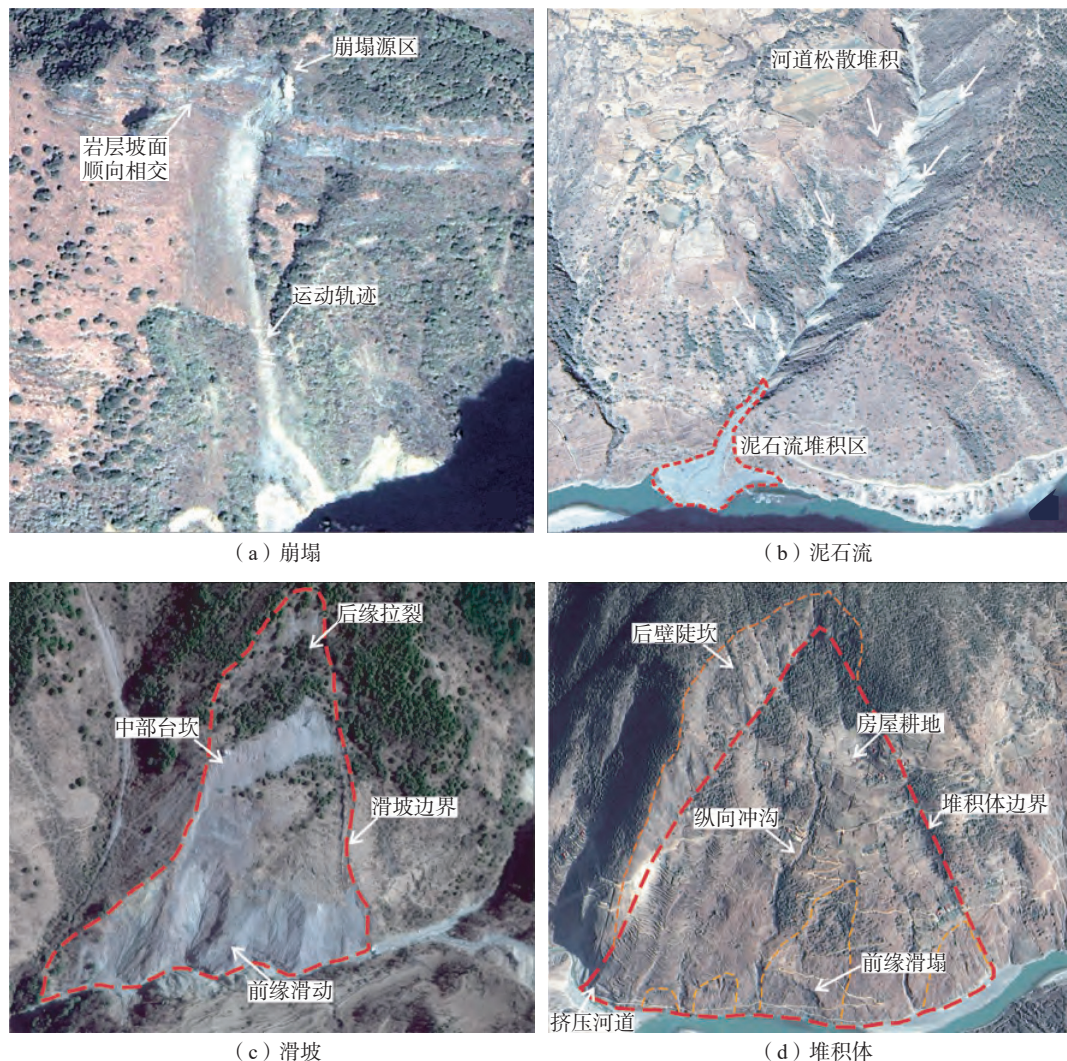


图 3 西香高速廊道典型不良地质体遥感影像

Fig. 3 Remote sensing image of typical adverse geological bodies

## ②泥石流识别标志

泥石流沟光学遥感识别主要从流域内松散物源分布情况和沟口是否有老的泥石流堆积物两方面进行判译。泥石流最突出的标志就是堆积区常呈扇形、锥形形状, 其次是物源区岩体风化严重, 沟道内发育多处小规模崩塌、滑坡等, 见图 3(b)。

## ③滑坡识别标志

滑坡主要分为老(古)滑坡和正在孕育的潜在滑坡两类, 其中, 已经发生过整体失稳的老(古)滑坡的识别相对容易, 其识别标志主要为整体呈现圈椅状地貌特征, 后缘可见滑坡壁, 中部可见滑坡台坎、封闭洼地、湿

地等, 前缘可见滑坡舌挤压河道导致河流改道, 坡体上植被与周边显著差异等。而对于正在孕育的潜在滑坡的识别标志主要为斜坡后缘裂缝和前缘小规模崩塌滑坡, 见图 3(c)。

## ④堆积体识别标志

堆积体地貌特征与老(古)滑坡类似, 常具有圈椅状形态特征, 一般坡体上冲沟发育, 植被较周边有显著差异, 中部夷平, 常分布村民集居区和耕地等, 见图 3(d)。

## (2) SBAS-InSAR 形变探测

SBAS-InSAR 由意大利学者 Berardino 等<sup>[39]</sup>提出, 通过对重复轨道观测获取的多时相雷达数据, 集中提取具

有稳定散射特性的高相干点目标的时序相位信号进行分析,反演研究区域地表形变平均速率和时间序列形变信息,可获得厘米级甚至毫米级的形变测量精度<sup>[17]</sup>。相较于差分干涉测量技术(Differential InSAR, DInSAR)和永久散射体干涉测量(Permanent/persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)等,该方法不仅能去除时空失相关、大气延迟相位等因素干扰,还能避免单一主影像造成的时空基线过长而引起的失相干效应,更适用于自然场景的地表形变监测<sup>[18-19]</sup>。

### 3 不良地质体识别结果

通过光学遥感解译和 SBAS-InSAR 综合判译,在西

香高速廊道内共识别出不良地质体 164 处,其中 D002、D003、D004、D019、D029、D030 等 10 处堆积体和 H027、H031、H041、H042、H043、H044、H045 等 16 处滑坡 SBAS-InSAR 探测有形变信号,总计探测到 26 处不良地质体。野外实地验证确认 147 处为不良地质体,17 处识别对象误判为滑坡,综合遥感识别正确率达 89.6%。野外调查新发现不良地质体 27 处,其中滑坡 13 处,崩塌 5 处,泥石流 5 处,堆积体 4 处。最终查明西香高速廊道发育 174 处不良地质体,其中滑坡(H)74 处,崩塌(B)40 处,泥石流(N)16 处,堆积体(D)44 处(图 4—5)。

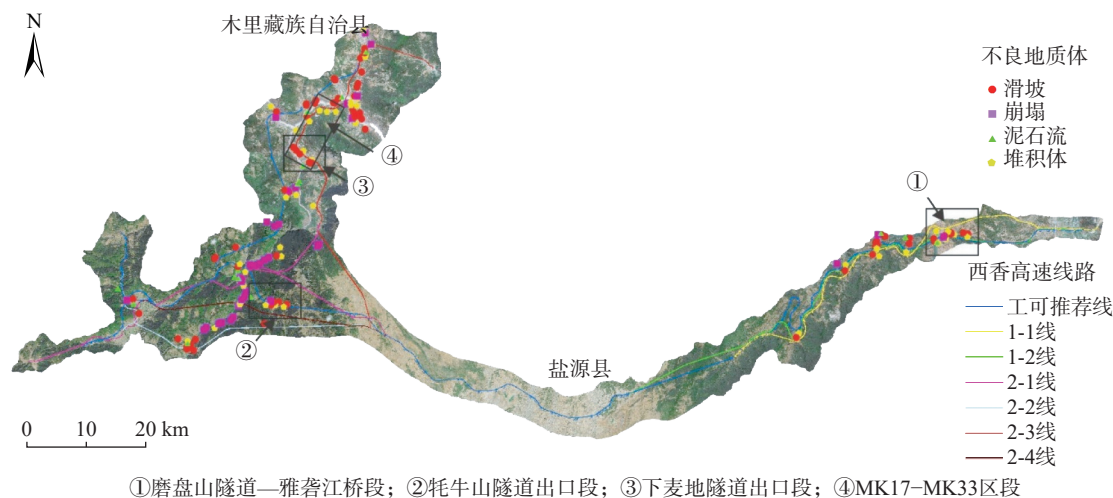


图 4 西香高速不良地质体分布图

Fig. 4 Distribution of the adverse geological body

廊道不良地质体平均发育密度为 0.8 处/km<sup>2</sup>,主要集中在主线 A 段、C 段和木里支线段,木里支线段发育最为密集,共 86 处,平均密度为 2.15 处/km,主线 B 段无不良地质体发育(表 1)。反映了不良地质体在空间上分布不均,这与线路穿越的地形和地质条件有关,主线 B 段位于盐源盆地,地形平坦,其它线路穿越受霍儿坪、麦架坪、卧罗河等十余条断层和雅砻江、小金河等河流影响的深切峡谷,不良地质体分布密集,公路修建面临较大挑战,需要在本研究成果基础上开展更详细的野外勘查工作。

### 4 典型区段不良地质体分析

西香高速廊道不良地质体空间分布不均,部分区段发育十分密集,对拟建线路威胁大,这些区段的不良地质体稳定性对线路比选和建设起着决定性作用。

#### 4.1 磨盘山隧道—雅砻江桥段

磨盘山隧道—雅砻江桥段位于得力铺荫山河沟内,主线 A 段 K<sub>53</sub>—K<sub>54</sub>+500 区段。区段内发育 8 处不良地质体,其中崩塌 1 处,滑坡 3 处,堆积体 4 处,密度达 5.33 处/km(图 6)。在降轨形变结果中探测到 D<sub>002</sub>、D<sub>003</sub>、D<sub>004</sub> 三处堆积体具有形变信息,见图 7(a)。图 7(b)为堆积体上分别选取的特征点 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 形变曲线图,各点累计形变量分别为 46.5 mm、38.2 mm 和 26.7 mm,处于匀速蠕变状态。受逆冲断层活动影响,此区段岩体风化强烈,残坡积碎石土厚度较大,在地表水长期作用下形成深切河谷,导致堆积体发生明显形变。D<sub>005</sub> 为发育于荫山河沟右岸的一处中型堆积体,面积约 7.6×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,堆积厚度 5~20 m,坡脚受掏蚀作用发生多处局部垮塌,并发育 1 处小型滑坡 H<sub>005</sub>,体积约 1.9×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。滑坡顶部有农田灌溉,坡体上可见地下水出露,稳定性较差,

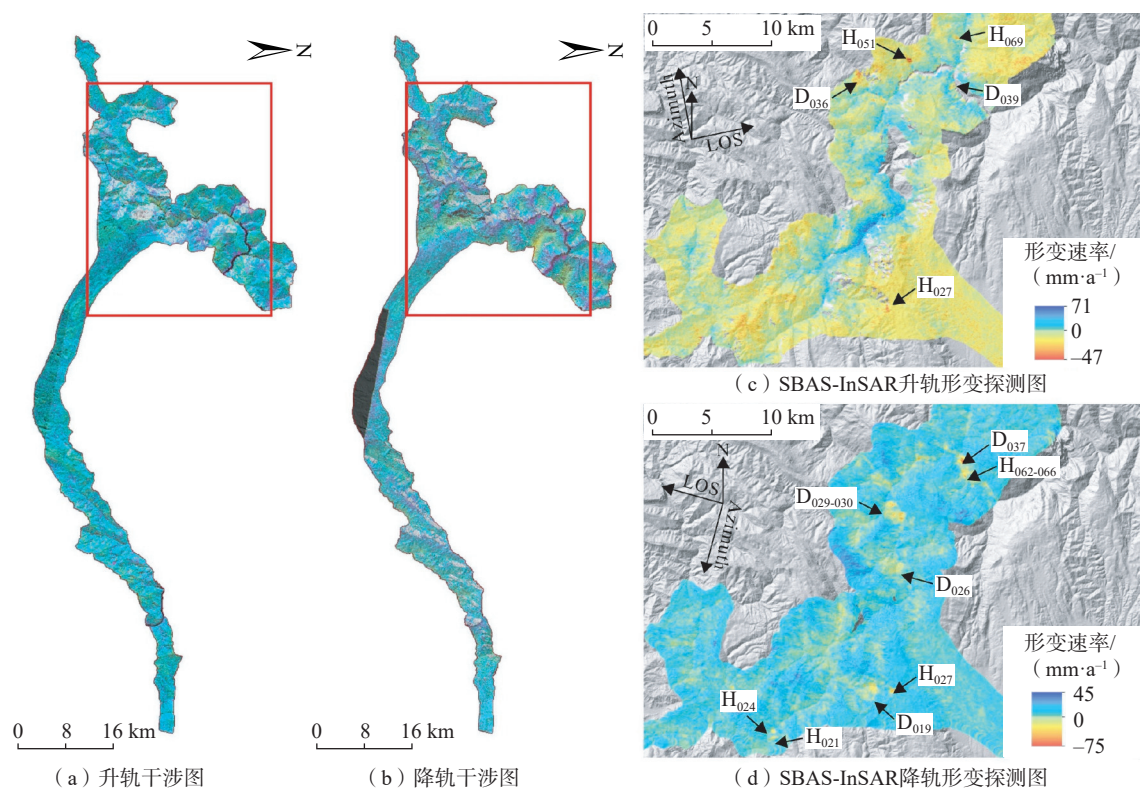


图5 InSAR 探测结果图

Fig. 5 Detection results of InSAR technology

表 1 西香高速廊道不良地质体分段统计表

| 区段    | 起止点                                         | 长度/km  | 崩塌/处 | 滑坡/处 | 泥石流/处 | 堆积体/处 | 总数量/处 | 密度/(处·km <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------------------------------|--------|------|------|-------|-------|-------|--------------------------|
| 主线A段  | K <sub>0</sub> +0.00—K <sub>73</sub> +100   | 73.10  | 3    | 18   | 3     | 13    | 37    | 0.51                     |
| 主线B段  | K <sub>73</sub> +100—K <sub>108</sub> +400  | 35.30  | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0                        |
| 主线C段  | K <sub>108</sub> +400—K <sub>165</sub> +400 | 57.00  | 18   | 13   | 5     | 10    | 46    | 0.81                     |
| 木里支线  | MK <sub>0</sub> +0.00—MK <sub>40</sub> +10  | 40.01  | 18   | 41   | 6     | 21    | 86    | 2.15                     |
| 泸沽湖支线 | LK <sub>0</sub> +0.00—LK <sub>12</sub> +920 | 12.92  | 1    | 2    | 2     | 0     | 5     | 0.42                     |
| 合计    |                                             | 218.33 | 40   | 74   | 16    | 44    | 174   | 0.80                     |

在降雨和工程扰动条件下可发生失稳(图 8)。工可推荐线路从 H<sub>005</sub> 滑坡和 D<sub>005</sub> 堆积体中部以桥梁方式通过, 2-1 比选线路以桥梁方式从 D<sub>005</sub> 堆积体后部通过, 受影响较大, 建议对线路进行局部优化。

4.2 牦牛山隧道出口段

牦牛山隧道出口段位于卧罗河右岸格罗地沟内, 主线 C 段 K<sub>122</sub>—K<sub>129</sub> 区段, 流域内高差 1 800 m, 沟长大于 10 km, 平均纵坡降约 141‰, 支沟鸡脚沟与主沟呈“Y”状发育。在沟道侵蚀作用下, 区段内不良地质体发育密集, 包括 7 处滑坡, 2 处堆积体, 2 处崩塌和 1 处大型泥石流, 密度达 1.57 处/km(图 9)。结合 SBAS-InSAR 结果发现, 滑坡 H<sub>027</sub>、H<sub>031</sub> 和堆积体 D<sub>019</sub> 具有形变信号, 在三个不良地质体形变较大区域取特征点 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>,

得到累计形变量分别为-55.7 mm、-51.9 mm 和-63.0 mm, 均处于匀速蠕变阶段(图 10)。

断层构造活动造成该区段岩体破碎, 堆积层厚度较大, 坡脚受沟道流水强烈掏蚀, 形成密集滑塌。H<sub>031</sub> 为沟道左岸一处小型滑坡, 前缘已发生多次滑塌, 中部拉裂台坎明显, 两侧发育冲沟, 降雨和流水持续作用将导致滑坡变形加剧。工可推荐线牦牛山隧道出口位于 H<sub>031</sub> 滑坡下部, 紧邻滑塌区, 建议对线路进行局部优化, 比选线路 2-2 和 2-4 在该区段均以隧道方式通过, 不受不良地质体影响(图 11)。

4.3 下麦地隧道出口段

下麦地隧道出口段位于小金河右岸下麦地乡, 木里支线 MK<sub>17</sub>+500—MK<sub>21</sub>+100 区段, 整个坡体由 2 处大

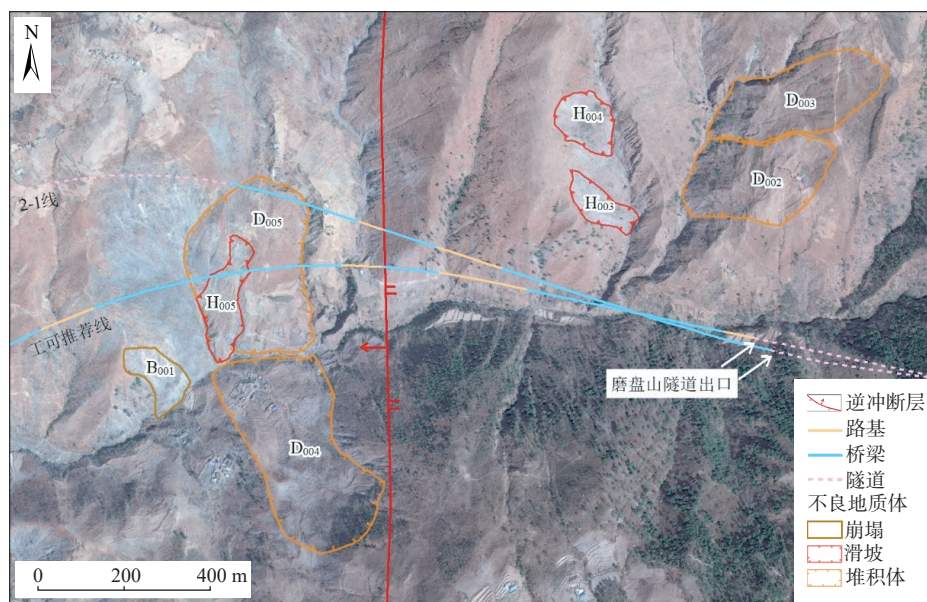
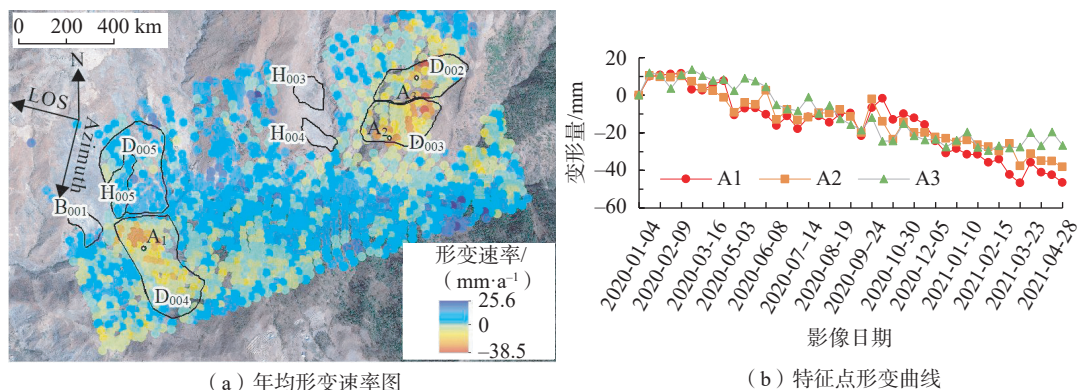


图 6 磨盘山隧道—雅砻江桥段遥感影像

Fig. 6 Remote sensing image along Mopanshan tunnel to Yalong River bridge

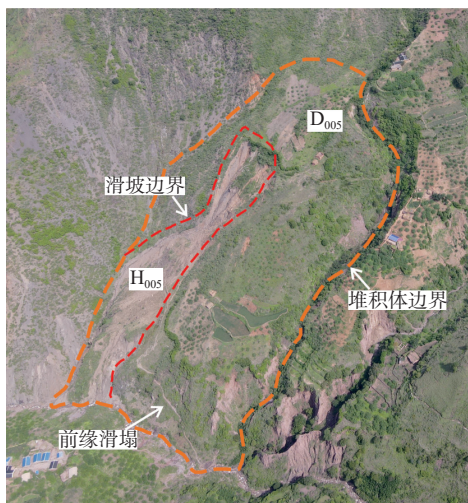


(a) 年均形变速率图

(b) 特征点形变曲线

图 7 磨盘山隧道—雅砻江桥段不良地质体 InSAR 探测结果

Fig. 7 InSAR detection results of adverse geological bodies along Mopanshan tunnel to Yalong River bridge

图 8 D<sub>005</sub> 堆积体无人机影像Fig. 8 UAV image of loose deposit D<sub>005</sub>

型堆积体组成, D<sub>029</sub> 受侧蚀作用显著, 发育 2 处滑坡 H<sub>040</sub>、H<sub>041</sub>、D<sub>030</sub> 受降雨和河流作用, 形成多处局部形变和纵向冲沟, 见图 12(a)。结合时序 InSAR 结果发现, D<sub>030</sub> 前缘形变信号明显, 见图 12(b)、12(c), 特征点 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 和 B<sub>3</sub> 的时间—形变曲线如图 12(d) 所示, 各点累计形变量分别为 74.6 mm、69.6 mm 和 20.8 mm, C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 在 2020 年 11 月 23 日之后的形变速率明显增大, 出现加速趋势, 可能由于库水位变化导致形变加剧。

通过实地调查发现, 堆积体 D<sub>029</sub>、D<sub>030</sub> 下伏基岩为中厚层砂岩夹薄层泥质砂岩, 风化程度高, 倾向与坡向基本一致, 稳定性较差。受人类工程活动影响, 坡体多处发生小规模滑塌, 道路变形明显。进一步工程扰动可能加剧堆积体变形。比选线路 2-3 拟以桥梁、路基方式通过堆积体 D<sub>030</sub>, 受影响较大, 建议线路采取“绕避”措施(图 13)。

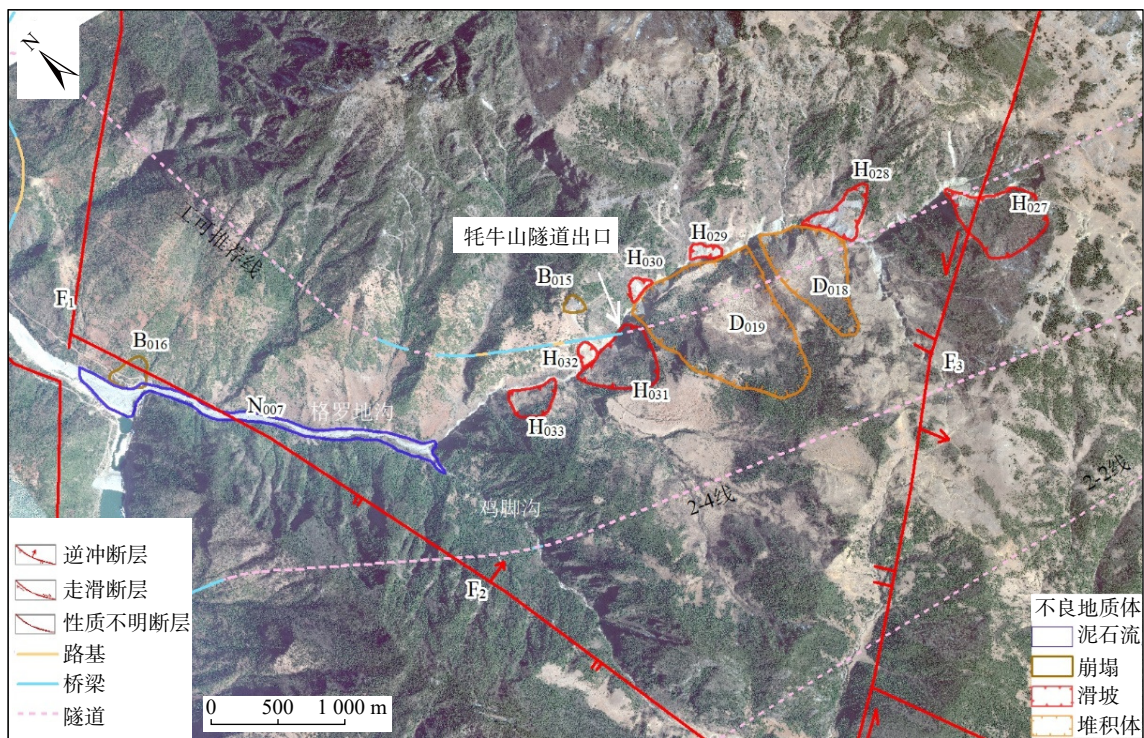


图 9 牦牛山隧道出口段遥感影像

Fig. 9 Remote sensing image along the exit section of Maoniushan tunnel

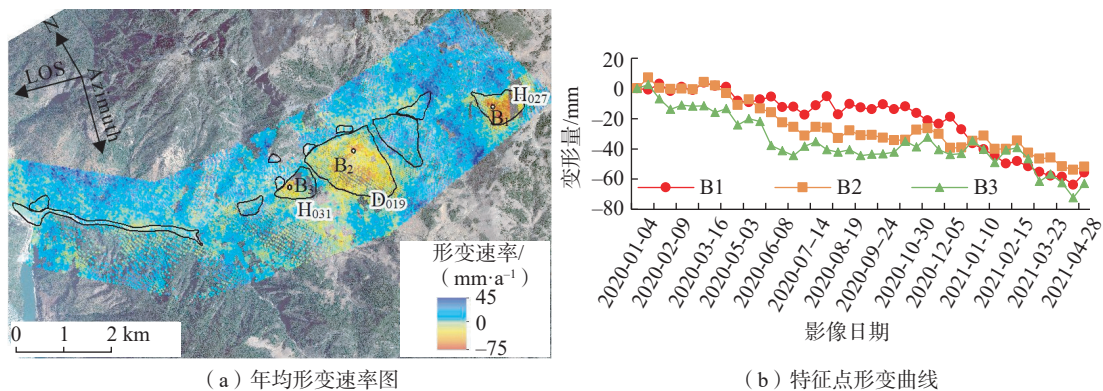


图 10 牦牛山隧道出口段不良地质体 InSAR 探测结果

Fig. 10 InSAR detection results of adverse geological bodies along the exit section of Maoniushan tunnel

5 讨论

(1)利用综合遥感手段能快速、宏观掌握拟建高速公路廊道不良地质体的发育和空间分布情况,弥补了传统地面调查对高位、高隐蔽性不良地质体难以识别的局限。但遥感手段也同样存在一定的局限性,光学影像时效性和分辨率不足、研究区植被覆盖率高、人类工程活动频繁等,都有可能造成不良地质体的误判和漏判。本次西香高速廊道不良地质体的遥感识别中,综合遥感识别出不良地质体 164 处,通过野外实地验证发现,误判不良地质体 17 处(均为滑坡),漏判不良地质体 27 处(其中滑坡 13 处,崩塌 5 处,泥石流 5 处,堆积体 4 处)。遥感识别中误判和漏判的不良地质体类型均以滑坡为主,这与光学卫星遥感影像空间分辨率和时间分辨率不足以及部分区域高植被覆盖有很大关系。研究区一些小规模浅表层溜滑迹象展现出与滑坡局部滑塌变形迹象相同的光谱和纹理特征,是造成滑坡误判的主要原因。同时,部分目前活动性不强的滑坡,其形态要素(平面形态、滑坡壁、滑坡台阶、滑坡舌、滑坡裂缝、滑坡鼓丘、封闭洼地等)和变形迹象在光学影像上显现不明显,即使光学影像分辨率达到亚米级,也容易漏判。此外,漏判的堆积体和泥石流集中在植被覆盖率高和水位

图 11 滑坡 H<sub>031</sub> 无人机影像Fig. 11 UAV image of loose landslide H<sub>031</sub>

起伏较大的区域,主要原因是:①堆积体在未扰动的状态下一般较为稳定,形变迹象不明显,在植被覆盖较少时,可通过地貌特征进行识别,但在植被高覆盖区则难以识别;②漏判的泥石流沟主要分布于锦屏一级水电站库区,受库水位变化影响,泥石流堆积扇在水位上升时期被淹没,容易造成泥石流的漏判,因此今后对水库区

不良地质体的遥感识别应尽可能采用水库蓄水前后和不同季节的多时相遥感影像进行对比解译。

(2) InSAR 技术在形变梯度极限、观测方向上的缺陷,以及受地形条件、大气波动等影响产生的误差,也有可能致不良地质体的误判和漏判。因此,从形变信息到确定不良地质体,需要结合地质资料综合考虑。例如,图 7 所示堆积体 D<sub>005</sub> 在 InSAR 结果中并无明显形变信息,但通过多期光学遥感影像特征和野外实地调查,可以准确判定其为不良地质体。因此,综合遥感手段和野外验证协同工作仍十分必要。此外,在水库等大型水体区域进行 InSAR 数据处理时,大气误差较显著,应采用大气误差校正模型,尽量降低大气误差影响,避免不良地质体的误判和漏判<sup>[40-45]</sup>。

(3) 西香高速廊道内发育大量规模巨大的堆积体,尤其以木里支线 MK<sub>17</sub>—MK<sub>33</sub> 段最为显著,图 14 展示了此区段的光学遥感影像和 InSAR 探测结果,除 D<sub>029</sub>、D<sub>030</sub> 和 D<sub>033</sub> 外,其它堆积体未探测到有效形变信息,目前处于基本稳定状态。但值得注意的是,此区段构造活动频繁,断层、河流等内外动力地质作用破坏了岩土体的完整性,在降雨、工程扰动等共同作用下,堆积体可能发生大规模失稳,对高速公路造成危害。因此,堆积

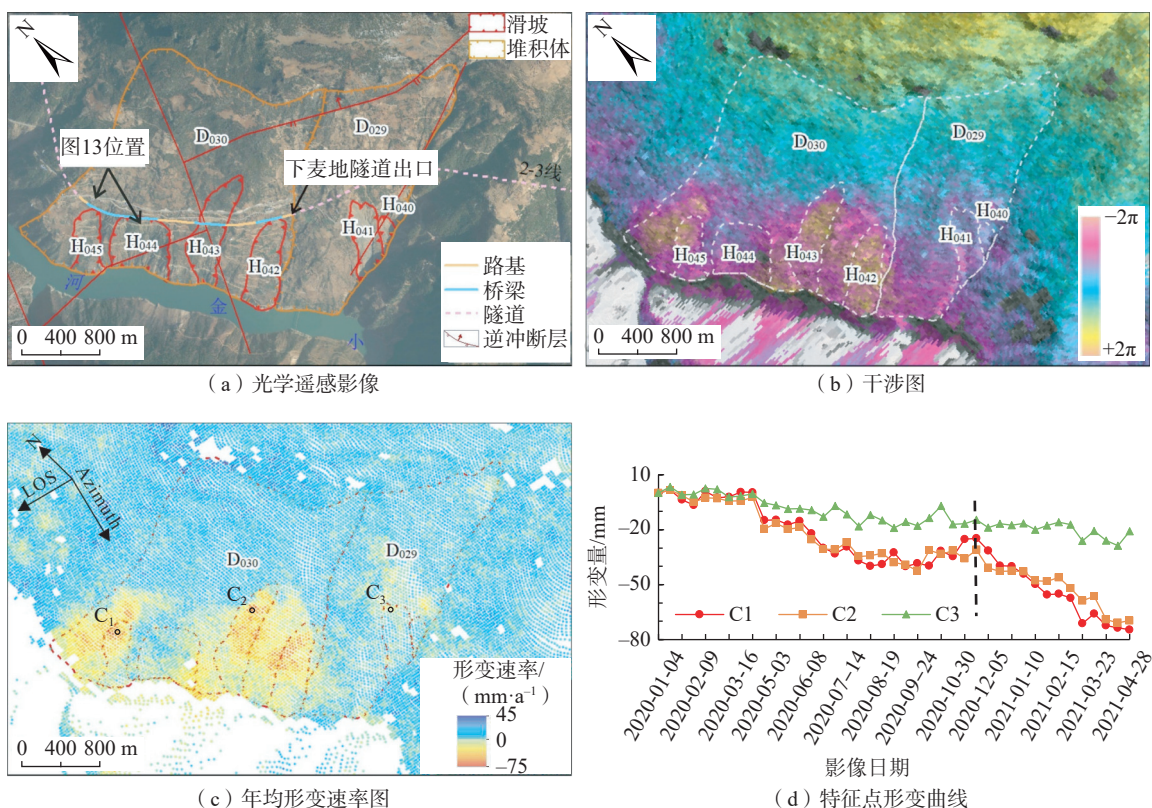


图 12 下麦地隧道出口段不良地质体综合遥感识别结果

Fig. 12 Integrated remote sensing detection along the exit section of Xiamaidi tunnel



图 13 下麦地隧道出口段不良地质体现场照片  
Fig. 13 Scene photograph of the exit section of Xiamaidi tunnel

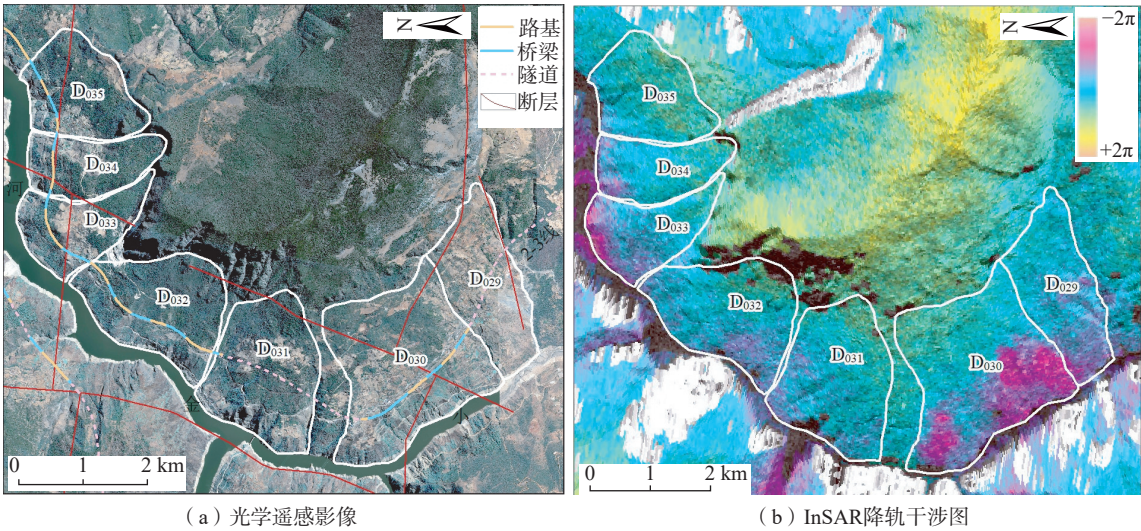


图 14 MK<sub>17</sub>—MK<sub>33</sub> 区段堆积体综合遥感识别图  
Fig. 14 Integrated remote sensing detection along section of MK<sub>17</sub>—MK<sub>33</sub>

体的稳定性应成为后期线路优化和工程施工的重点关注对象。

6 结论

文中利用“天-空-地”一体化综合遥感手段对西香高速公路廊道不良地质体进行识别,并对重点区段不良地质体的危险性进行分析评价,取得了以下主要认识:

- (1)通过遥感解译圈定西香高速廊道不良地质体 164 处,后期野外实地验证确认 147 处为不良地质体,遥感解译识别正确率为 89.6%。野外调查新增不良地质体 27 处,最终确定西香高速廊道内共发育不良地质体 174 处,其中滑坡 74 处,崩塌 40 处,泥石流 16 处,堆积体 44 处,具有形变信号的不良地质体 26 处。
- (2)西香高速廊道内不良地质体平均发育密度为 0.8 处/km,但空间分布不均,主要集中分布为主线 A 段、

C 段和木里支线段。木里支线段不良地质体发育最为密集,共发育 86 处不良地质体,平均密度为 2.15 处/km。

(3)磨盘山隧道—雅砻江桥段、牦牛山隧道出口段和下麦地隧道出口段等区段不良地质体发育密集、规模大、稳定性差,对拟建线路威胁大,且治理难度大,建议在后期进行线路比选等工作时,应尽量对以上不良地质体进行绕避。

参考文献(References):

[1] 殷跃平. 贵州省三穗—凯里高速公路“5·11”滑坡灾害调查 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 138. [YIN Yueping. Investigation on "5·11" landslide disaster of Sansui-Kaili expressway in Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 138. (in Chinese with English abstract) ]

- [2] 央视网. 陕西延安黄延高速工地山体滑坡 [OL]. (2014-10-12). <http://tv.cctv.com/2014/10/12/VIDE1413047758298495.shtml>. [CCTV. Landslide at construction site of Huangling-Yan'an expressway in Yan'an, Shaanxi Province [OL]. (2014-10-12). <http://tv.cctv.com/2014/10/12/VIDE1413047758298495.shtml>. (in Chinese)]
- [3] 詹越. 公路危岩崩塌安全监控及预警技术 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. [ZHAN Yue. Highway dangerous-rock collapse safety monitoring and early warning technology [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张蕴灵, 傅宇浩, 李为乐, 等. 2020年9月20日雅西高速姚河坝崩塌调查 [J]. *山地学报*, 2021, 39(3): 450–460. [ZHANG Yunling, FU Yuhao, LI Weile, et al. Preliminary investigation on the Yaoheba rockfall along the Ya'an-Xichang highway on September 20, 2020, Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2021, 39(3): 450–460. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许也平, 王萍. 遥感地质像片用于公路选线 [J]. *公路*, 1988, 33(6): 20–22. [XU Yeping, WANG Ping. Remote sensing geological images are used for highway route selection [J]. *Highway*, 1988, 33(6): 20–22. (in Chinese)]
- [6] 赵永国. 宝天公路选线工程地质环境遥感解译法的应用 [J]. *中国公路学报*, 1992, 5(4): 44–49. [ZHAO Yongguo. The application of methods of remote sensing interpretation on engineering geological environments along preselected routes of Baoji-Tianshui highway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1992, 5(4): 44–49. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈楚江, 薛重生, 余绍淮. 西藏墨脱公路的灾害地质遥感识别 [J]. *工程地质学报*, 2004, 12(1): 57–62. [CHEN Chujiang, XUE Chongsheng, YU Shaohuai. Identification of geological hazards with remote sensing in the Motuo, Tibet [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(1): 57–62. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张明华. 公路工程地质灾害遥感图像识别及解译方法 [J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2): 233–237. [ZHANG Minghua. The way of image recognizing and interpreting with remote sensing for geological disasters of highway engineering [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 233–237. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李宁. 西藏林芝市派墨公路地质灾害风险评价 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [LI Ning. Geological disaster risk assessment of the PAIMO highway engineering in the Tibet's Nyingchi City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 安鑫, 牛军强, 匡经水, 等. 遥感技术在国家高速公路 G85麻柳湾—昭通段中的应用研究 [J]. *公路交通技*
- 术, 2012, 28(5): 31–36. [AN Xin, NIU Junqiang, KUANG Jingshui, et al. Research on application of remote sensing technology in Maliuwan—Zhaotong section of national expressway G85 [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2012, 28(5): 31–36. (in Chinese)]
- [11] 卢斌莹, 陈正江, 白延平, 等. 高速公路地质灾害遥感调查方法: 以陕西省为例 [J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 946–950. [LU Binying, CHEN Zhengjiang, BAI Yanping, et al. Remote sensing method for freeway geological disaster: A case study of Shaanxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 946–950. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 梁京涛, 王军, 王猛, 等. 四川省绵竹至茂县公路工程地质遥感调查与评价 [J]. *灾害学*, 2012, 27(1): 83–86. [LIANG Jingtao, WANG Jun, WANG Meng, et al. Remote sensing survey and evaluation of engineering geology along Mianzhu-Maoxian highway in Sichuan Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(1): 83–86. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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)]
- [14] 中国地质调查局. 地质灾害识别: 寻找大地上的“潜伏者” [OL]. (2021-05-10). [https://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/202105/t20210510\\_669916.html](https://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/202105/t20210510_669916.html). [China Geological Survey. Identification of hazards: Looking for "lurkers" on the earth [OL]. (2021-05-10). [https://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/202105/t20210510\\_669916.html](https://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/202105/t20210510_669916.html). (in Chinese)]
- [15] 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. [XU Qiang. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651–1659. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 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)*, 2019, 44(9): 1342–1354. [LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. 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*, 2019, 44(9): 1342–1354. (in Chinese with English abstract)]
- [17] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR

- interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River basin [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95–109.
- [18] 王振林, 廖明生, 张路, 等. 基于时序 Sentinel-1 数据的锦屏水电站左岸边坡形变探测与特征分析 [J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(2): 204–209. [WANG Zhenlin, LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, et al. Detecting and characterizing deformations of the left bank slope near the Jinping hydropower station with time series Sentinel-1 data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(2): 204–209. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2018, 43(12): 2039–2049. [ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of West China using time series SAR interferometry: A case study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2039–2049. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王天河. 基于多源遥感的康定—炉霍拟建高速公路地质灾害危险性评价及线路优化分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [WANG Tianhe. Risk assessment of geological hazards and route optimization analysis of Kangding-Luhuo proposed expressway based on multi-source remote sensing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 李长顺. 攀西地区 (西昌市) 地质灾害详细调查报告 [R]. 成都: 四川省地质调查院, 2013. [LI Changshun. Detailed survey report of geological hazard in Panxi region (Xichang City) [R]. Chengdu: Sichuan Institute of Geological Survey, 2013. (in Chinese)]
- [22] 姚巍, 赵其华, 李坛, 等. 四川省盐源县地质灾害分布特征与形成条件研究 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2008, 19(1): 48–51. [YAO Wei, ZHAO Qihua, LI Tan, et al. Characteristics of geology hazards distribution and formation conditions in Yanyuan Country, Sichuan Province [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2008, 19(1): 48–51. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 田万生. 四川省 2015 年凉山州木里县地质灾害详细调查报告 [R]. 兰州: 甘肃水文地质工程地质勘察院, 2016. [TIAN Wansheng. Detailed investigation report on geological hazards in Muli County, Sichuan Province in 2015 [R]. Lanzhou: Gansu Hydrogeology Engineering Geology Survey Institute, 2016. (in Chinese)]
- [24] 凉山彝族自治州交通运输局. G7611 线西昌至香格里拉 (四川境) 高速公路项目社会资本方招标资格预审公告 [EB/OL]. (2021-04-30). [http://jtj.lsz.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/tzgg\\_32060/202104/t20210430\\_1892777.html](http://jtj.lsz.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/tzgg_32060/202104/t20210430_1892777.html). [Transportation bureau of Liangshan Yi autonomous prefecture. G7611 line Xichang to Shangri-La (Sichuan border) highway project social capital bidding pre-qualification announcement [EB/OL]. (2021-04-30). [http://jtj.lsz.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/tzgg\\_32060/202104/t20210430\\_1892777.html](http://jtj.lsz.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/tzgg_32060/202104/t20210430_1892777.html). (in Chinese)]
- [25] ZHU L, DENG Y, HE S M. Characteristics and failure mechanism of the 2018 Yanyuan landslide in Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2019, 16(12): 2433–2444.
- [26] HU G S, LIU M, CHEN N S, et al. Real-time evacuation and failure mechanism of a giant soil landslide on 19 July 2018 in Yanyuan County, Sichuan Province, China [J]. *Landslides*, 2019, 16(6): 1177–1187.
- [27] 伍康林, 陈宁生, 胡桂胜, 等. 四川省盐源县玻璃村“7·19”特大滑坡灾害应急科学调查 [J]. *山地学报*, 2018, 36(5): 806–812. [WU Kanglin, CHEN Ningsheng, HU Guisheng, et al. Emergency investigation to 7-19 landslide disaster in Boli Village, Yanyuan County, Sichuan, China [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(5): 806–812. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 翁其能, 唐红梅, 陈洪凯, 等. 滑坡治理过程中岩土体变形场的演绎趋势分析: 以西 (昌) 木 (里) 路新烧房滑坡为例 [J]. *重庆交通学院学报*, 2001, 20(1): 69–73. [WENG Qineng, TANG Hongmei, CHEN Hongkai, et al. Developing tendency analysis of slope deformation composed of loose rock in the course of harnessing of landslide—Taking the XinShaofang landslide in the Highway from Xichang to Muli as Example [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 2001, 20(1): 69–73. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 陈敏, 刘良春, 叶胜华. 弯曲-拉裂型滑坡形成机制和稳定性分析: 以木里河卡基娃滑坡为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(1): 58–64. [CHEN Min, LIU Liangchun, YE Shenghua. The formation mechanism and stability analysis of bend-crack landslide: Taking the Kajiwa landslide of Muli River as an example [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 58–64. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 董建辉, 魏良帅, 唐然, 等. 木里县水洛乡东拉滑坡安全监测及变形破坏分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 543–547. [DONG Jianhui, WEI Liangshuai, TANG Ran, et al. Safety monitoring and deformation damage of Dongla landslide in Shuiluo of Muli County [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(3): 543–547. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 吴莉娟, 肖天贵, 顾林康, 等. 四川凉山平川镇“7·14”泥石流灾害的气象成因 [J]. *成都信息工程学院学报*, 2011, 26(6): 675–686. [WU Lijuan, XIAO Tianguai, GU Linkang, et al. Analysis on the meteorological causes of the July 14 extreme debris flow hazards in Pingchuan town of Liangshan prefecture in Sichuan Province [J]. *Journal of Chengdu*

- University of Information Technology, 2011, 26(6): 675 – 686. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] 张楠, 魏云杰. 四川省盐源县小河沟泥石流灾害调查研究 [ J ]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 148 – 153. [ ZHANG Nan, WEI Yunjie. Investigation of Xiaohegou debris flow in Yanyuan County, Sichuan Province [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 148 – 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 33 ] 罗宇. 四川省盐源县格地罗沟泥石流灾害性分析 [ D ]. 成都: 成都理工大学, 2012. [ LUO Yu. Disaster analysis of debris flow in Gediluo gully, Yanyuan County, Sichuan Province [ D ]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] 田淑芳, 詹骞. 遥感地质学 [ M ]. 北京: 地质出版社, 2013. [ TIAN Shufang, ZHAN Qian. Remote sensing geology [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 2013. (in Chinese) ]
- [ 35 ] 卓宝熙. 工程地质遥感判释与应用 [ M ]. 北京: 中国铁道出版社, 2011. [ ZHUO Baoxi. Remote sensing interpretation & application of geology engineering [ M ]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese) ]
- [ 36 ] GAO J, MARO J. Topographic controls on evolution of shallow landslides in pastoral Wairarapa, New Zealand, 1979-2003 [ J ]. *Geomorphology*, 2010, 114(3): 373 – 381.
- [ 37 ] MARCELINO E V, FORMAGGIO A R, MAEDA E E. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil [ J ]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(3): 181 – 191.
- [ 38 ] FIORUCCI F, CARDINALI M, CARLÀ R, et al. Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images [ J ]. *Geomorphology*, 2011, 129(1/2): 59 – 70.
- [ 39 ] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375 – 2383.
- [ 40 ] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 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)*, 2019, 44(7): 967 – 979. [ LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions [ J ]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967 – 979. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 41 ] 李元松, 高晖, 陈峰, 等. 乌尉高速公路边坡稳定性综合评价 [ J ]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 150 – 156. [ LI Yuansong, GAO Hui, CHEN Feng, et al. Comprehensive assessment of slope stability in Wu—Yu highway [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 150 – 156. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 42 ] 邱明明, 杨果林, 张沛然, 等. 浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究 [ J ]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 135 – 143. [ QIU Mingming, YANG Guolin, ZHANG Peiran, et al. Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 135 – 143. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 43 ] 陈云生, 刘光彬, 张一铭, 等. 阳鹿高速公路K52新滑坡变形特征与成因机理分析 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 83 – 91. [ CHEN Yunsheng, LIU Guangbin, ZHANG Yiming, et al. Deformation characteristics and genetic mechanism of a new landslide at K52 of Luyang freeway [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 83 – 91. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 44 ] 陈锐, 范小光, 吴益平. 基于数据挖掘技术的白水河滑坡多场信息关联准则分析 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 1 – 8. [ CHEN Rui, FAN Xiaoguang, WU Yiping. Analysis on association rules of multi-field information of Baishuihe landslide based on the data mining [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 1 – 8. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 45 ] 廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 等. 香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 121 – 129. [ LIAO Xiaoping, XU Fengguang, CAI Xudong, et al. Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 121 – 129. (in Chinese with English abstract) ]