



引文格式:陈宝林,李为乐,陆会燕,等.基于SBAS-InSAR的黄河干流军功古滑坡形变分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1407-1421.DOI:10.13203/j.whugis20220196

Citation:CHEN Baolin,LI Weile,LU Huiyan,et al.Deformation Analysis of Jungong Ancient Landslide Based on SBAS-InSAR Technology in the Yellow River Mainstream[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(8):1407-1421.  
DOI:10.13203/j.whugis20220196

# 基于SBAS-InSAR的黄河干流军功古滑坡形变分析

陈宝林<sup>1,2</sup> 李为乐<sup>1,3</sup> 陆会燕<sup>1,3</sup> 付豪<sup>1,4</sup> 周胜森<sup>1,3</sup> 黄维<sup>5</sup>

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

2 西安测绘总站,陕西西安,710054

3 滑坡灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室,四川成都,610059

4 四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院,四川成都,610081

5 61287部队,四川成都,610036

**摘要:**2019-09-20,中国青海省玛沁县拉加镇军功古滑坡发生局部失稳,导致公路交通中断,严重威胁当地居民生命财产安全,亟需查明古滑坡的形变区和形变规律,为防治工程设计和监测预警提供参考。首先利用高分辨率卫星影像和数字高程模型数据并结合现场调查,基于滑坡形态特征和形变迹象对古滑坡进行分区;然后利用2017-01—2020-12的Sentinel-1雷达卫星降轨数据,基于小基线集合成孔径雷达干涉测量技术(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)对古滑坡的地表形变特征和形变规律进行分析。基于滑坡形态特征和变形迹象,将古滑坡分为4个次级滑坡区,SBAS-InSAR形变结果显示古滑坡整体处于持续的缓慢蠕滑状态。滑坡强变形区主要位于公路开挖段,人类活动对古滑坡稳定性扰动较大,滑坡强变形区形变速率与降雨具有较好的响应关系。虽然古滑坡局部已进行了抗滑桩等工程治理,但由于古滑坡存在多级滑面,已有抗滑桩深度不够,虽发挥了一定的抗滑作用,但未起到完全阻止滑坡整体蠕滑变形的作用,建议后续治理工程应利用钻探等勘察技术手段查明多级滑面深度后进行设计施工,并在强形变区安装裂缝计等现场实时监测预警设备,结合雷达卫星InSAR中长期监测,实现对该滑坡点、面结合的监测预警。

**关键词:**军功滑坡;古滑坡复活;滑坡分区;形变规律;小基线集合成孔径雷达干涉测量

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-09-11

DOI:10.13203/j.whugis20220196

文章编号:1671-8860(2024)08-1407-15

## Deformation Analysis of Jungong Ancient Landslide Based on SBAS-InSAR Technology in the Yellow River Mainstream

CHEN Baolin<sup>1,2</sup> LI Weile<sup>1,3</sup> LU Huiyan<sup>1,3</sup> FU Hao<sup>1,4</sup> ZHOU Shengsen<sup>1,3</sup> HUANG Wei<sup>5</sup>

1 Sichuan Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Xi'an Division of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

3 Laboratory of Landslide Risk Early-Warning and Control, Ministry of Emergency Management, Chengdu 610059, China

4 Sichuan Institute of Land and Space Ecological Restoration and Geological Hazard Prevention, Chengdu 610081, China

5 Troops 61287, Chengdu 610036, China

**Abstract:** Objectives: On September 20, 2019, the Jungong ancient landslide in Lajia Town, Maqin County, Qinghai Province, China suffered a local failure, which led to the interruption of traffic and seriously threatened the safety of local residents' lives and properties. It is urgent to find out the deformation area and deformation law of the ancient landslide, and to provide the support for prevention and control engineering design, monitoring and early warning. Methods: First, using high-resolution satellite images, digital

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3000401);国家创新研究群体科学基金(41521002)。

第一作者:陈宝林,硕士,主要从事地质灾害早期识别研究。chenbaolin@stu.cdut.edu.cn

通讯作者:李为乐,博士,教授。liweile08@mail.cdut.edu.cn

elevation model data and combined with field investigations, the ancient landslide were zoned based on landslide morphological characteristics and signs of deformations; further, Sentinel-1 radar satellite descending data from January 2017 to December 2020 were used to analyze the surface deformation characteristics and deformation patterns of the ancient landslide based on small baseline subset interferometric synthetic aperture radar technology (SBAS-InSAR). **Results:** Based on the morphological characteristics and deformation signs of the landslide, the ancient landslide was divided into four sub-areas. The SBAS-InSAR results show that the ancient landslide is in a continuous slow creeping state. The strong deformation area of the landslide is mainly located in the road excavation section. Human activities greatly disturb the stability of the ancient landslide. The deformation rate of the strong deformation area of the landslide has a good relationship with rainfall. **Conclusions:** Although the ancient landslide has been partially treated with anti-slide piles and other projects, the ancient landslide has multi-level sliding surfaces, and the depth of the existing anti-slide piles is not enough. Although the ancient landslide has played a certain role in anti-slide, it has not completely prevented the creep deformation of the landslide. It is suggested that the subsequent treatment projects should use drilling and other exploration techniques to find out the depth of the multi-level sliding surfaces before designing, and installing on-site real-time monitoring and early warning equipment such as crack meters in the strongly deformed areas. Combined with the medium and long-term monitoring of radar satellite InSAR, a point-surface monitoring and early warning system could be realized.

**Key words:** Jungong landslide; ancient landslide resurgence; landslide zonation; deformation mechanism; small baseline subsets; interferometric synthetic aperture radar

古滑坡一般指形成时代久远的滑坡,是斜坡长期复杂演化过程的产物,在人类活动、强降雨及地震等因素作用下有可能会发生复活<sup>[1]</sup>。近年来,随着人类工程活动的不断加剧和极端天气事件频繁出现,古滑坡复活事件频繁发生,造成的人员伤亡、基础设施毁坏和经济损失日益严重<sup>[1-2]</sup>。例如,2018-07-12甘肃省舟曲县江顶崖古滑坡发生复活,复活体堵塞白龙江南峪乡段河道形成堰塞湖,导致国道G345线中断,淹没南峪村和南峪电站<sup>[3]</sup>。2020-06-17四川丹巴县阿娘寨古滑坡复活,导致道路、居民房屋、水电站和输电线路受损,下游河床显著抬升<sup>[4]</sup>。青海省玛沁县拉加镇黄河干流南岸发育的军功滑坡为一巨型古滑坡,现今滑坡局部活动强烈,自20世纪80年代开始,该滑坡多次导致其上的西久公路(省道S101)损毁中断<sup>[5-7]</sup>,虽进行了局部工程治理,但滑坡活动仍在持续。2019-09-20,该滑坡再次发生局部失稳,导致公路交通中断,严重威胁当地居民生命财产安全。

古滑坡复活失稳前往往有较长时间的缓慢蠕滑变形,利用多元监测技术对其复活后的变形进行监测,结合相应的预测模型,研究其形变分布特征、形变速率和长期形变规律,可为古滑坡早期风险识别、失稳模式和机理分析、危险范围和风险等级确定和提前预警提供重要支撑<sup>[1,8-11]</sup>。目前常用的滑坡监测技术主要包括全球定位系

统(global positioning system, GPS)、全站仪测量、裂缝计监测等地面测量手段,然而这些传统手段已经难以满足大范围、高时空分辨率的监测需求,并且费时费力、成本高昂,作业人员的人身安全难以得到保障<sup>[12-14]</sup>。近年来,不断发展的合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术以其可以精确获取微小形变信息、全天候、全天时、穿透云层、成本低等优点,已经广泛地应用于滑坡识别与监测中<sup>[15-16]</sup>。同时,大量研究结果证实了小基线集InSAR (small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术具有获取微小形变信息和长时间序列缓慢地表变形的优势,适用于山区滑坡形变探测与监测<sup>[17-19]</sup>。例如2018-10和2018-11金沙江白格滑坡前后两次堵江事件发生后,陆会燕等<sup>[20]</sup>利用SBAS-InSAR技术完成了金沙江白格滑坡上下游70~100 km范围流域滑坡隐患早期识别,发现存在3处堵江风险的滑坡。另外有学者利用SBAS-InSAR技术分别对沃达古滑坡<sup>[9]</sup>和雄巴古滑坡<sup>[10]</sup>等进行形变监测分析,主要基于形变结果对古滑坡的形变分区、形变规律和运动模式进行分析,为类似古滑坡的形变监测提供了新思路。

已有针对军功古滑坡的研究主要利用现场工程地质调查和钻探等方法,对其形变特征、稳定性和形变机理进行研究<sup>[5-7,21]</sup>,尚未见对其形变

规律的定量研究。军功古滑坡体积巨大,且存在多级滑坡<sup>[5-7]</sup>,工程治理难度大,有必要在查明其主要强形变区和形变规律的基础上,然后有针对性地进行工程治理和长期监测预警。本文首先利用高分辨率卫星影像和数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据并结合现场调查,基于滑坡形态特征和变形迹象,对古滑坡进行形变分区;然后利用2017-01—2020-12的Sentinel-1雷达卫星降轨数据,基于SBAS-InSAR技术对古滑坡的地表形变特征和形变规律进行分析,为古滑坡后期工程治理和监测预警提供有益参考。

## 1 研究区概况

军功古滑坡位于青海省果洛藏族自治州玛

沁县拉加镇(滑坡中心点坐标为100°38'27.66"E, 34°40'21.51"N)。研究区是典型的高原山地地貌,平均海拔约4100 m(图1(a))。

伴随着青藏高原进一步隆升,江河水系溯源侵蚀加剧,在青藏高原和黄土高原过渡带内的青海东部地区形成了众多高达500 m的高陡边坡,为区内特大型滑坡的形成提供了有利自然条件<sup>[22-23]</sup>。区内多年平均降水量在420~560 mm之间,降水量年内分配不均,主要集中在6月—10月份,占年平均降水量的80%以上。研究区构造发育,北临断陷盆地边界拉家寺断裂,南临多条断裂(图2),区内岩体中构造裂隙较为发育,岸坡岩体破碎,是较典型的滑坡易发区<sup>[21,24]</sup>。本文利用Sentinel-1降轨卫星数据基于SBAS-InSAR技术在研究区探测出多处处于缓慢蠕滑状态的大型滑坡隐患(图1(c))。

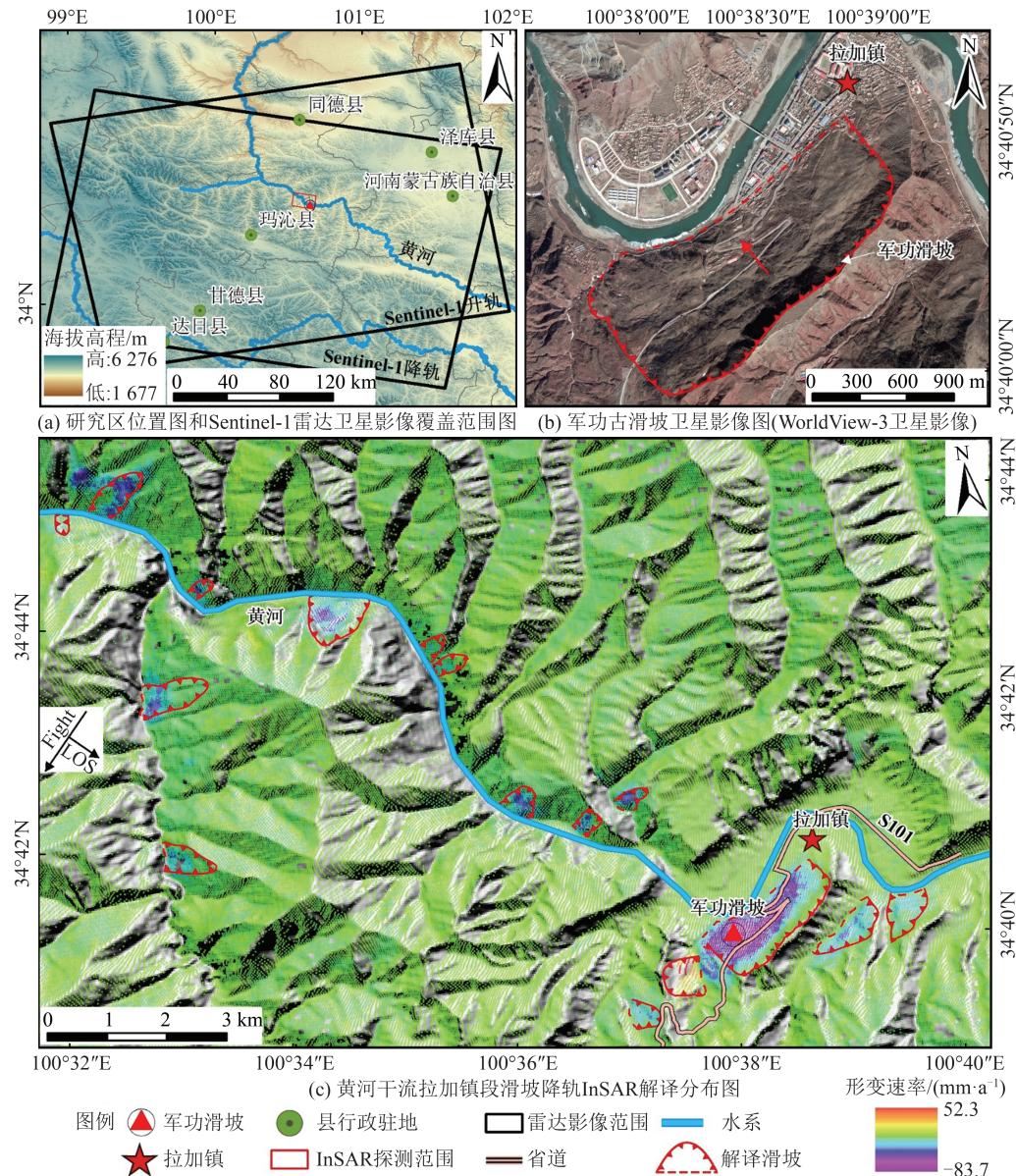


图1 研究区位置图

Fig. 1 The Location Map of the Study Area

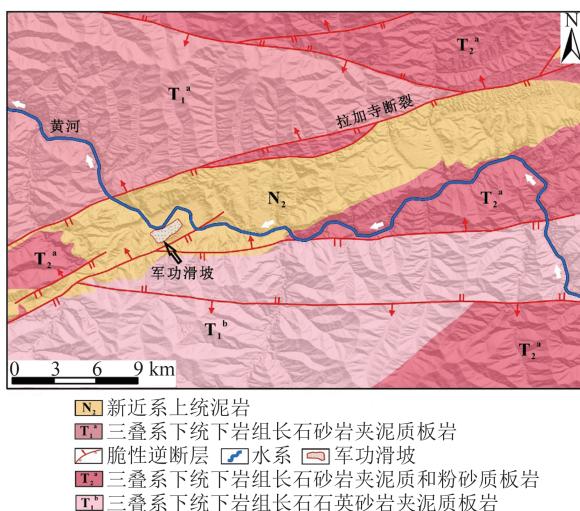


图2 研究区地质图

Fig. 2 Geological Map of the Study Area

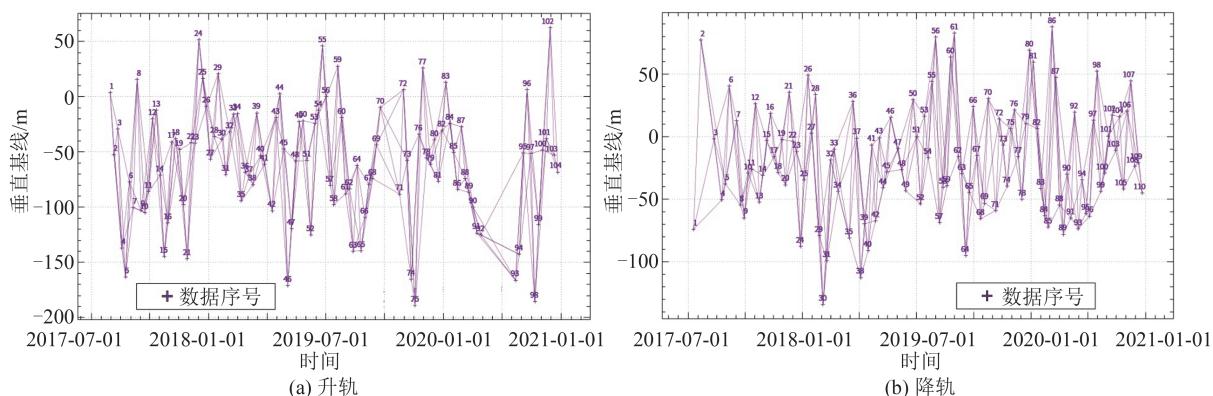


图3 Sentinel-1影像时空基线图

Fig. 3 Spatial and Temporal Baselines of Sentinel-1 Images

此外,收集了研究区2017-02-17、2018-03-23的0.3 m分辨率WorldView-3卫星影像、2019-03-29的0.8 m分辨率GF-2卫星影像和1 m分辨率DEM(由青海省水文地质工程地质环境地质调查院提供的1:2 000地形图生成)等数据,用于军功滑坡变形区划分和强变形区解译。同时收集了玛沁县气象站2017-01—2020-12降水量数据,用于分析军功滑坡形变与降雨量之间的关系。

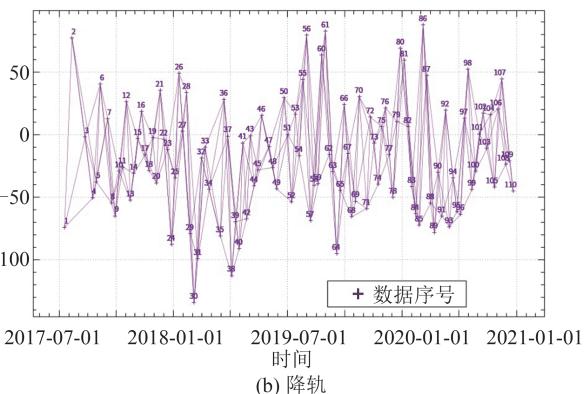
## 2.2 SBAS-InSAR技术

常规差分InSAR技术(differential InSAR,DInSAR)易受到大气延迟和失相干影响,导致形变测量误差较大。基于时间序列的InSAR方法的提出,如永久散射体InSAR(permanent scatterers InSAR,PS-InSAR)和SBAS-InSAR技术等,大大解决了这一问题。SBAS-InSAR通过对同一研究区多景合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)影像(通常大于6景)设定较小的时间基线阈值,选取多景影像为主影像,其他为从影像,挑选出相干性好的干涉对,通过轨道参数去除

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

本文主要采用欧洲空间局发射的C波段Sentinel-1雷达卫星影像进行滑坡形变探测,该卫星的重返周期为12 d,具有较高的时间分辨率。共收集了2017-01—2020-12期间共104景升轨和110景降轨影像,如图1(a)所示,同时收集了研究区12.5 m分辨率的先进陆地观测卫星DEM数据去除地形相位。升轨数据的时间基线阈值为132 d,空间基线阈值为215.1 m,共生成306组干涉对;降轨数据时间基线阈值为90 d,空间基线阈值为177.7 m,共生成324组干涉对,如图3所示。



平地相位,利用高精度DEM消除地形相位,利用滤波、多视等方法增加相干性<sup>[25]</sup>。对缠绕的干涉相位解缠,并判断各相干像元相位与观测时间的关系,利用奇异值分解和最小二乘法估算形变参数,并基于残差估计大气相位,从而获得最终的形变结果<sup>[26]</sup>。相较于PS-InSAR技术,SBAS-InSAR技术更适用于山区环境<sup>[27,28]</sup>。本文SBAS-InSAR数据处理采用GAMMA SAR干涉测量软件,处理流程图见图4。

## 3 滑坡基本特征与分区

军功古滑坡纵长600~950 m,宽约2 000 m,坡高180~300 m,坡度约25°~35°,主滑方向为290°~350°。坡体发育有3~6级滑移台阶,横向上升台面不连续,台面宽度数米至数十米不等。东、南侧滑坡后壁明显,呈陡坡状,局部为陡崖,高度40~50 m。古滑坡滑体厚约30~100 m,母岩主要为泥岩,滑体以碎块石土为主,滑体后缘、

表面局部亦可见粉土、卵石, 滑体表面及前缘可见卵石胶结体, 下部主要为新近系红色-橘红色厚层状泥岩, 泥岩产状  $25^\circ \angle 5^\circ$ , 形成顺向缓倾坡<sup>[7,24]</sup>。

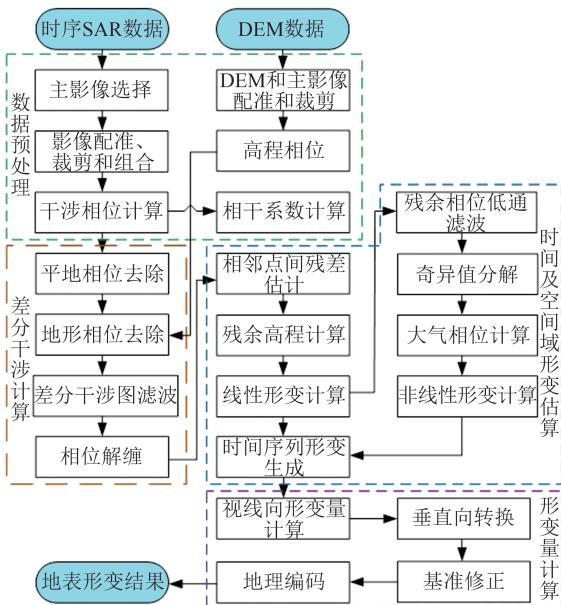


图 4 SBAS-InSAR 技术处理流程图

Fig. 4 Processing Flowchart of SBAS-InSAR

根据军功古滑坡形态特征以及现今变形活动迹象, 同时参考 WordView-3 卫星影像和 DEM 数据目视解译, 并查看相关勘察报告<sup>[24]</sup>, 将古滑坡分为 4 个次级滑坡(图 5)。I #滑坡位于军功古滑坡的最东段, 光学影像上坡体整体呈圈椅状, 滑坡纵长约 507 m, 宽约 575 m, 主滑方向约为  $315^\circ$ 。在 I #滑坡左前部发育有强变形区(I -1), 变形区纵长约 178 m, 宽约 251 m, 现场调查表明该区域变形迹象明显, 滑坡后缘及坡体拉裂缝较为发育。II #滑坡位于省道 S101 第三道弯东部, 其纵长约 624 m, 宽约 310 m, 主滑方向约为  $327^\circ$ 。其坡体发育有强变形区(II -1), 变形区纵长约 148 m, 宽约 282 m, 省道 S101 呈“S”形从其坡体通过。III #滑坡处于省道 S101 第三道弯中部, 滑体纵长约 718 m, 宽约 365 m, 主滑方向约为  $345^\circ$ 。滑体前缘为黄河凹岸, 长期遭受侵蚀, 在其前缘发育有小型滑坡群。IV #滑坡处于省道 S101 第三道弯第三盘西部, 纵长约 930 m, 宽约 560 m, 主滑方向约为  $343^\circ$ 。光学影像上发现, IV #坡体后缘发育一处天然汇水洼地, 且坡体有多处泉点出露。滑坡前缘处于黄河凹岸段, 侵蚀强烈, 因此沿老滑体前缘普遍发生滑坡, 形成多处滑塌。

## 4 形变结果分析

军功古滑坡所处坡体的坡向为北西向, 在本次 InSAR 形变探测中, Sentinel-1 降轨雷达卫星数据整体形变探测效果较好, 而升轨数据只能探测到部分形变信号(图 6)。这主要是由于 Sentinel-1 升轨雷达卫星数据可以探测位于坡向朝东坡体上的形变信号, 坡向朝西的斜坡在 SAR 影像会出现阴影、顶底倒置、叠掩的几何畸变现象<sup>[11]</sup>。图 7 为利用 Sentinel-1 降轨雷达卫星数据, 基于 SBAS-InSAR 技术获得的 2017-01-18—2020-12-22 军功古滑坡的视线方向(line of sight, LOS)年均形变速率分布图。在监测时间段内, 军功古滑坡整体处于持续蠕滑形变中。图 7 中形变值为负值(紫色), 代表坡体沿着 LOS 方向远离卫星运动; 形变值为正值(红色), 代表坡体沿着 LOS 方向靠近卫星运动。

### 4.1 I #滑坡形变结果

根据 SBAS-InSAR 探测结果, 监测期内 I #滑坡最大形变速率达  $65.1 \text{ mm/a}$ , 强变形区主要位于坡体左前部, 与光学解译结果较为吻合(见图 8(a))。通过多期次遥感影像对比, 可以发现强变形区坡体后缘发育多处拉裂缝, 并且不断扩大延展, 导致后缘出现多级下错, 同时左右两侧剪切裂缝与后缘裂缝相接, 坡体前缘轻微隆起并发育多处滑塌(图 8(b)、8(c)、8(d))。

为分析 I #滑坡形变规律, 沿 A-A'剖面线在滑坡后缘、中部及前缘分别选取 a1~a3 共 3 处监测点绘制时间序列曲线。时间序列曲线显示(图 9(a)), a1 点监测曲线基本保持平稳, 未发生明显波动, 监测期内累积形变量仅  $4.7 \text{ mm}$ ; a2 点仅在 2018 年雨季后发生明显加速, 但在来年 5 月曲线又恢复平稳, 监测期内累积形变量达  $93.4 \text{ mm}$ ; a3 点形变趋势与降雨有较好的响应规律, 可以发现形变开始时间和雨季开始时间存在滞后效应, 在每年雨季之后监测点均会加速变形, 而在雨季监测点形变相对较小, 其中 a3 监测点在 2018-10 后加速明显, 形变量发生陡增, 2018-11—2019-09 形变量增加  $79.5 \text{ mm}$ , 平均形变速率约  $86.7 \text{ mm/a}$ , I -1 变形区最终在 2019-09-20 发生失稳。

为进一步分析 I #滑坡的变形破坏模式, 选取 A-A' 剖面线绘制了形变速率剖面图(图 10)。根据形变速率剖面图及现场调查可以发现, 滑坡后缘主要为古滑坡的主断壁, 残留的堆积物较少, 形变速率较小; 滑坡中部靠近前缘部位形变

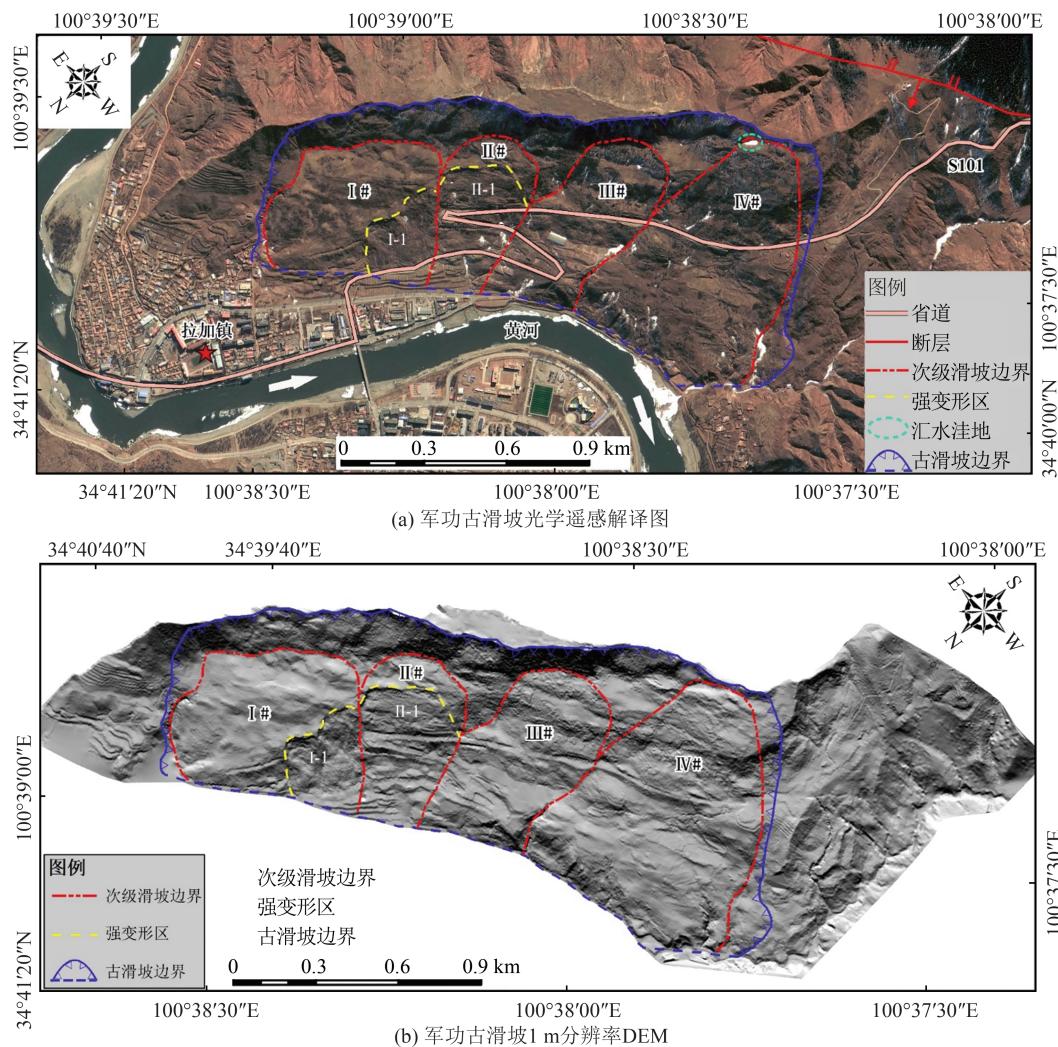


图5 军功古滑坡变形区划分及强变形区解译图

Fig. 5 Division of the Deformation Area of the Jungong Ancient Landslide and the Interpretation of the Strong Deformation Area

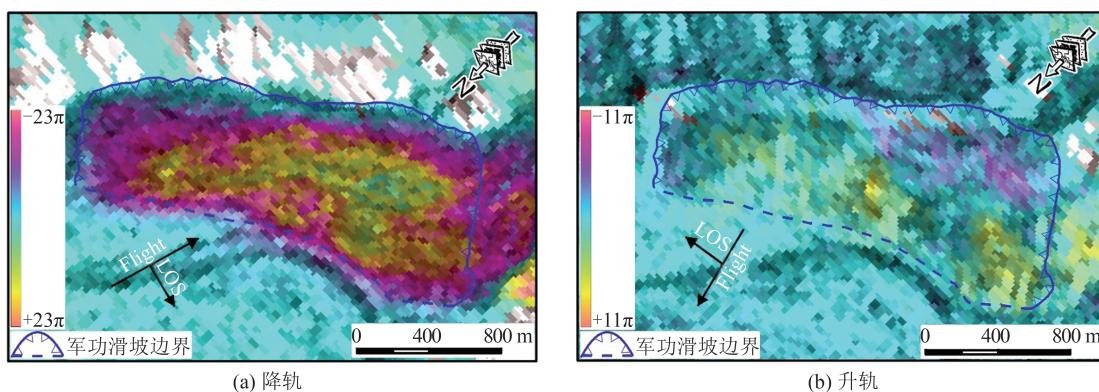


图6 军功古滑坡SBAS-InSAR年均形变相位结果

Fig. 6 Average Annual Deformation Phase of the Jungong Ancient Landslide by SBAS-InSAR

较大,现场调查也发现中部坡体发育多级陡坎;滑坡前缘为强变形区,强变形区段与I-1变形区吻合,强变形区后缘形变最大,同时也是坡度最大的部位,坡度约为51°。在前缘公路段形变速率发生陡降,现场调查以及2019-09-20滑坡失稳后

发现公路段变形强烈,而公路前部坡度减小,地形较为平缓,且形变较小。推测I-1变形区存在次级滑面,剪出口位于公路处。形变剖面整体显示滑坡前缘公路开挖段形变较大,滑坡中部、后缘形变速率次之。

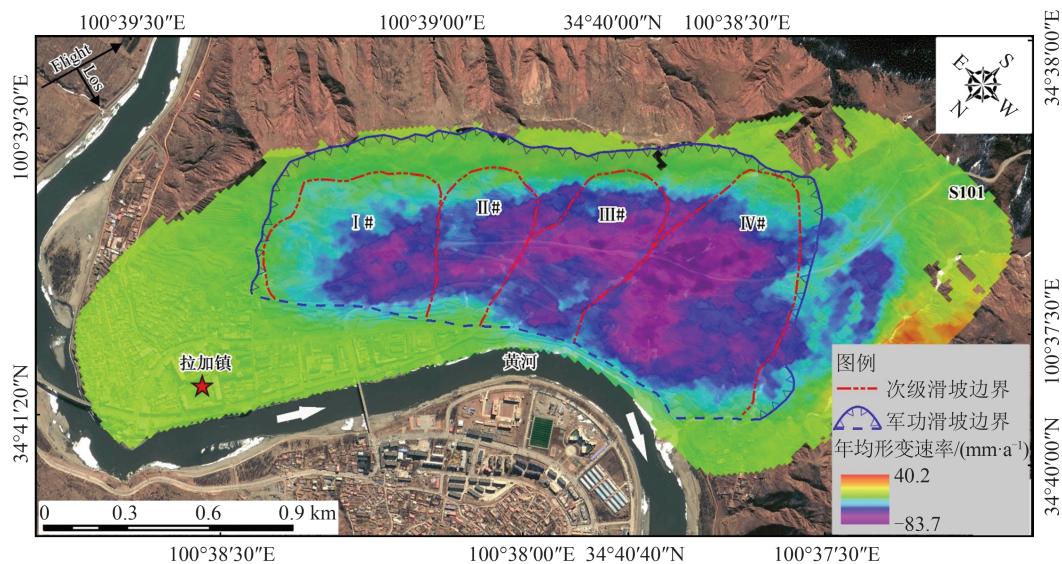


图 7 军功古滑坡降轨 SBAS-InSAR 年均形变速率图

Fig. 7 Average Annual Deformation Velocity Rate of the Jungong Ancient Landslide by Descending SBAS-InSAR

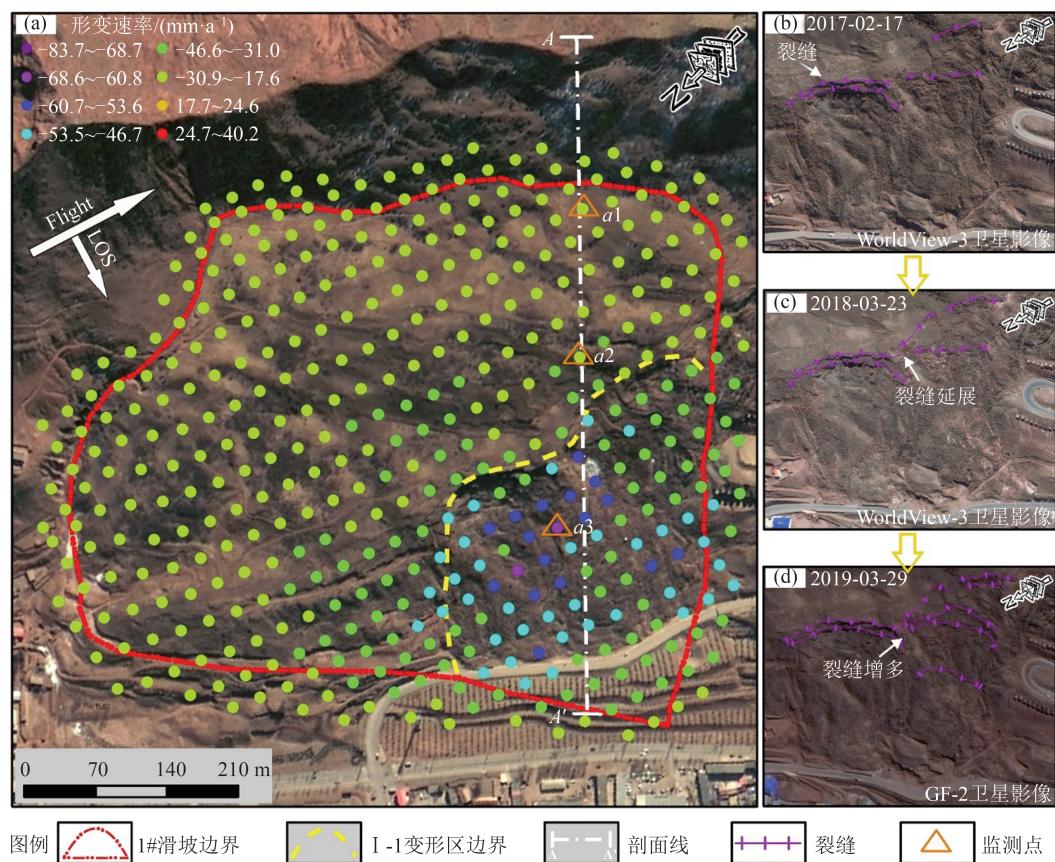


图 8 I #滑坡年均形变速率及 I -1 变形区多期遥感卫星影像图

Fig. 8 Average Annual Deformation Velocity Rate of I # Landslide and the Multi-phase Remote Sensing Satellite Images of I -1 Deformation Area

#### 4.2 II #滑坡形变结果

根据 SBAS-InSAR 探测结果, 监测期内 II # 滑坡最大形变速率达  $63.4 \text{ mm/a}$ , 强变形区位于滑坡中部, 公路部门在变形区坡体修建有截排水沟, 并在公路段也采取了抗滑桩和挡土墙等治理措施, 如图 11 所示。现场调查发现, 强

变形区变形迹象明显, 在 P1 点处发育有次级滑动, 并形成下错陡坎, P2 点处坡表的截排水沟也发生拉裂、错断等破坏现象, P3 点处坡表发现有裂缝群, 同时 P4 点处已修建的抗滑桩工程也受到一定程度损坏, 其下方土体发生下错(图 11)。

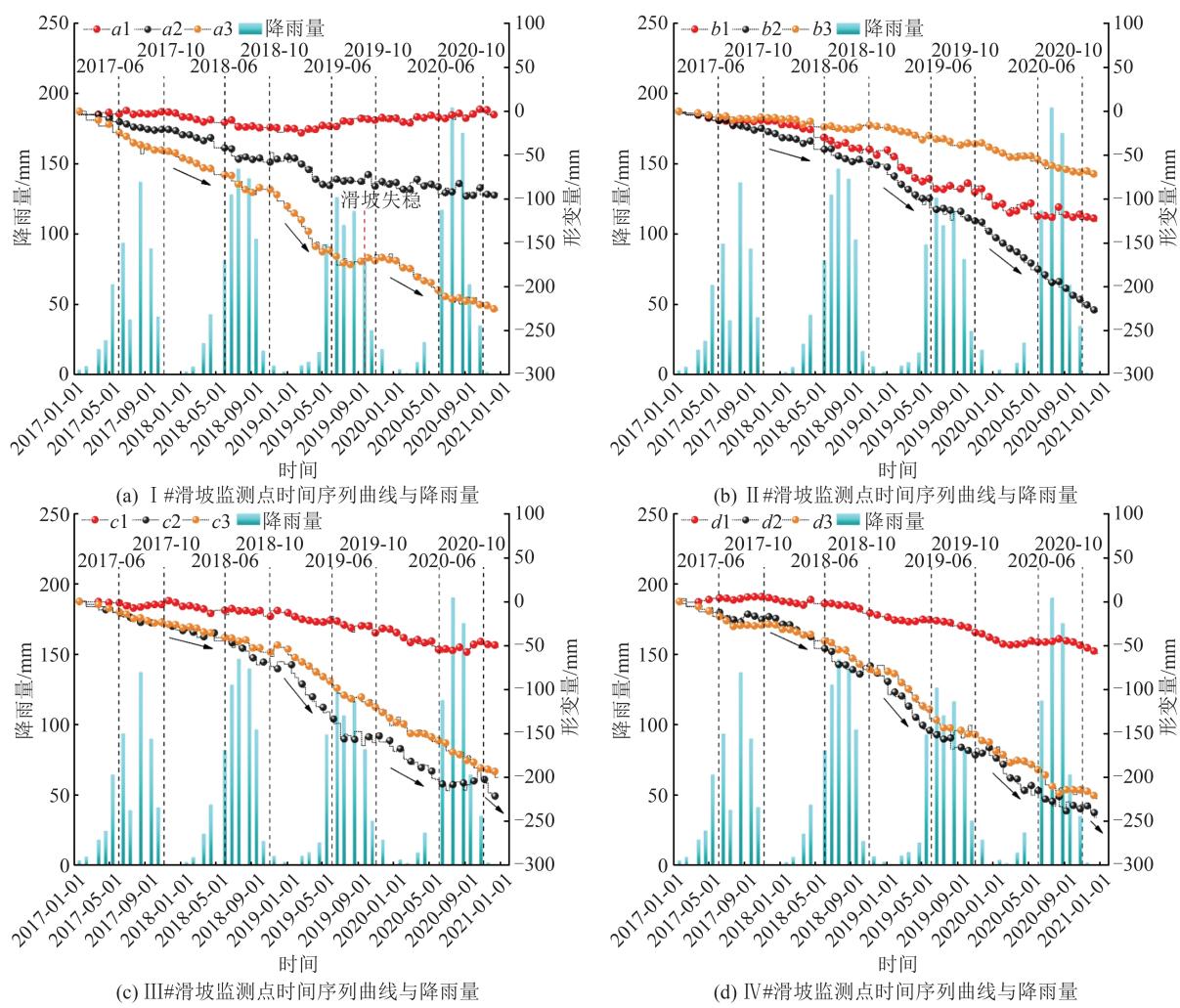


图9 InSAR时序形变与降雨响应关系

Fig. 9 Relationship of Time Series InSAR Deformation and Rainfall Response

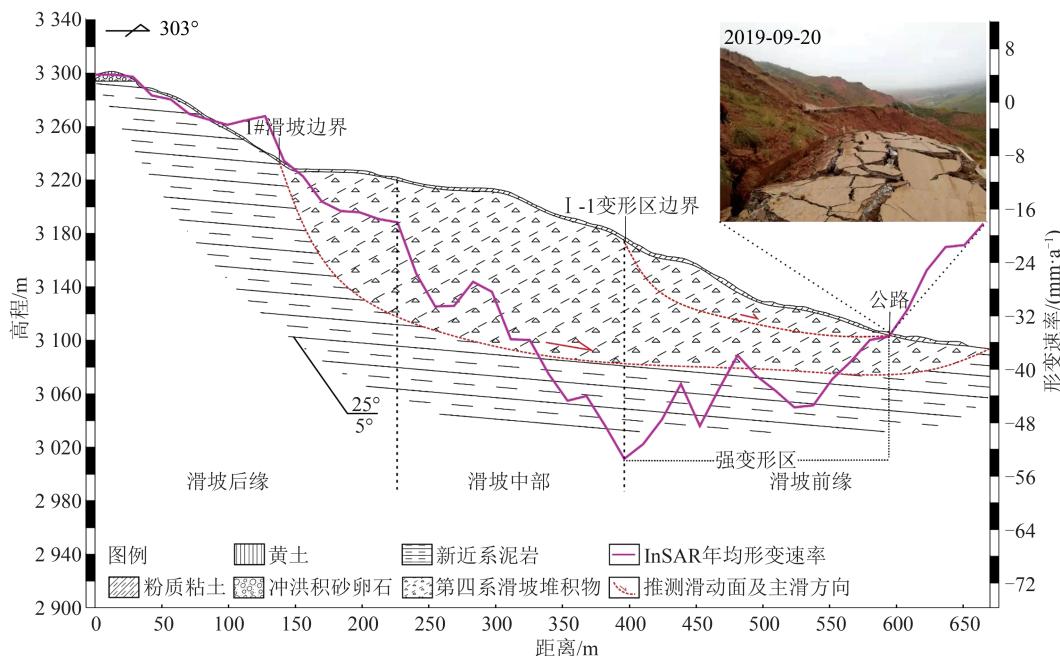


图10 I #滑坡A-A'剖面形变图

Fig. 10 A-A' Section Deformation Diagram of I # Landslide

为分析Ⅱ#滑坡形变规律,沿B-B'剖面线在坡体选取b1~b3共3处监测点绘制时间序列曲线。时间序列曲线显示(图9(b)),b1和b2监测点形变趋势较为相近,与降雨有较好的响应规律,在每年雨季之后监测点会加速变形。但b1监测点形变速率要明显小于b2点,在监测期内b1监测点累积形变量124.7 mm,年均形变速率为38.3 mm/a,而b2监测点累积形变量已达227.2 mm,年均形变为61.1 mm/a,时间序列曲线显示b2监测点目前仍处于持续变形中。b3监测点时间序列曲线相对平缓,仅在2019年雨季后形变曲线发生较明显波动,监测期内累积形变量为73.5 mm,年均形变速率为19.3 mm/a。

为进一步分析Ⅱ#滑坡的变形破坏模式,选

取B-B'剖面线绘制了形变速率剖面图(图12)。通过形变速率剖面图及现场调查发现,滑坡后缘主要为古滑坡的主断壁,与Ⅱ-1边界处发育一处陡坎,形变速率主要受强变形区影响,靠近强变形区部位形变速率越大;滑坡中部是坡体的强变形区,形变速率较大区域均位于公路边坡处,而在抗滑桩治理段,形变速率剖面明显向上“凸”,形变速率减小,表明已有的抗滑桩工程起到了抑制滑坡的作用,在第一道弯公路段形变速率再次发生陡降,结合现场变形迹象及地形,推测Ⅱ-1变形区存在次速率级滑面,剪出口位置位于第一道弯公路处;滑坡前缘主要为居民区,地形平缓,形变速率较小。形变剖面整体显示Ⅱ#滑坡中部公路段形变速率较大,滑坡前缘、后缘形变速率次之。

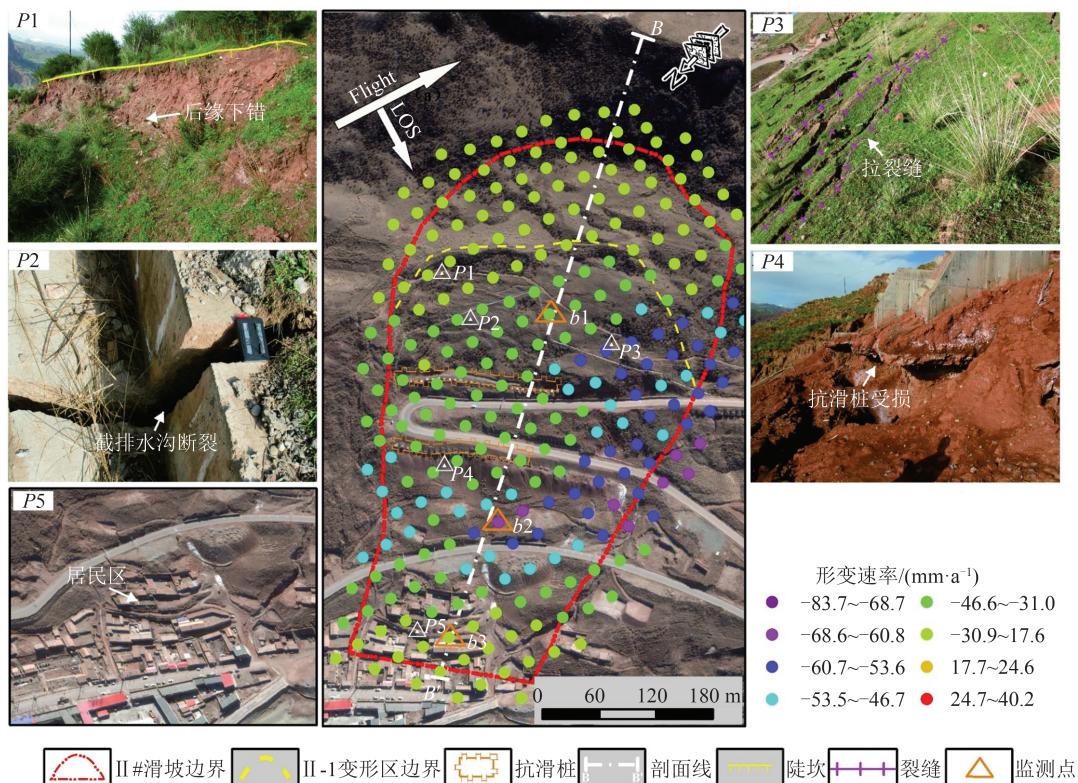


图11 Ⅱ#滑坡年均形变速率及强变形区变形破坏迹象图

Fig. 11 Average Annual Deformation Velocity Rate of Ⅱ# Landslide and the Signs of Deformation and Failure in the Strong Deformation Area

### 4.3 Ⅲ#滑坡形变结果

根据SBAS-InSAR探测结果,监测期内Ⅲ#滑坡最大形变速率达77.3 mm/a,滑坡中部省道S101段及滑坡前缘形变较大(图13)。为分析Ⅲ#滑坡形变规律,沿C-C'剖面线在滑坡后缘、中部及前缘分别选取c1~c3共3处监测点绘制时间序列曲线。时间序列曲线(图9(c))显示,c1监测点在监测期内,形变曲线相对平缓,一直处于蠕滑状态,累积形变量仅52.2 mm;c2监测点形变趋势与

降雨有较好的响应规律,在每年雨季后监测点会产生加速变形,直至来年5月—6月又趋于稳定,c2监测点在2018年雨季后加速最为明显,2018-11至2019-05间形变量达56.4 mm,监测期末c2监测点累积形变量达220.3 mm,年均形变速率为64.8 mm/a;c3监测点在2018-10前,形变曲线相对平缓,在雨季后产生加速变形,直至监测期末一直维持匀速变形趋势,未发生明显波动,监测期内累积形变量达200.0 mm,年均形变速率为53.9 mm/a。

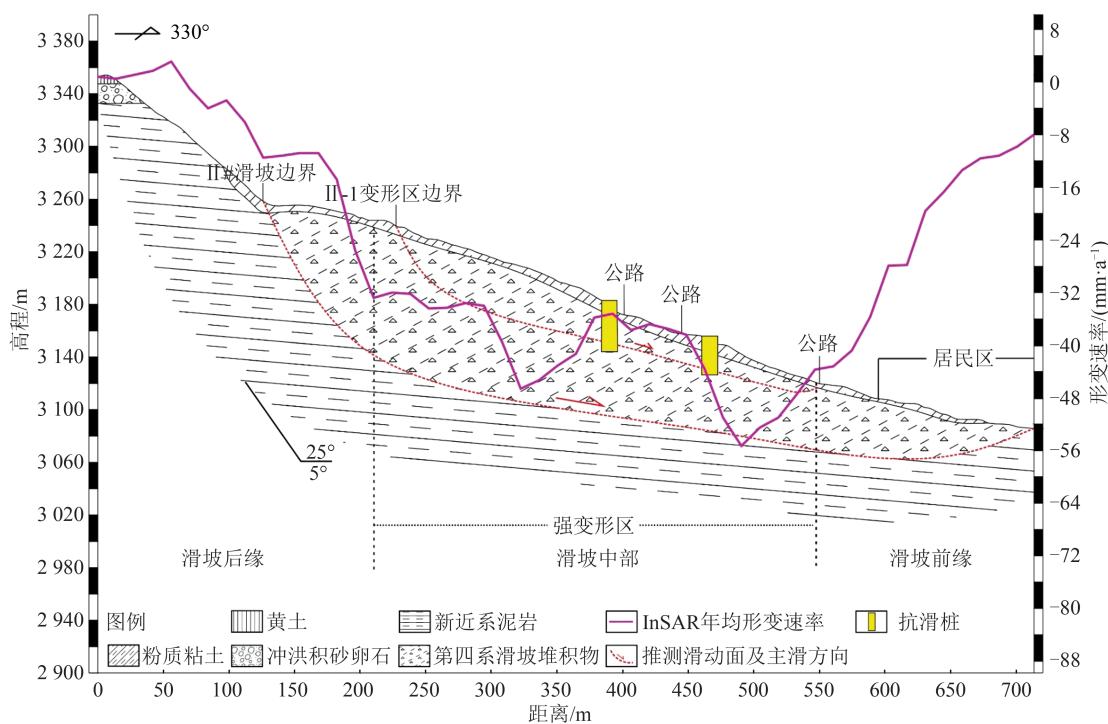


图 12 II# 滑坡 B-B' 剖面形变图

Fig. 12 B-B' Section Deformation Diagram of II# Landslide

为进一步分析Ⅲ#滑坡的变形破坏模式,选取C-C'剖面线绘制了形变速率剖面图(图14),通过形变速率剖面图及现场调查发现,滑坡后缘主要为古滑坡主断壁和Ⅲ#滑坡后缘,形变速率相对较小;滑坡中部省道S101段,现场调查发现该区域公路边坡土体松散,发育有垮塌,并且距离居民区较近(图13中P1),由于居民区地形平缓,形变速率明显减小;滑坡前缘强变形区位于黄河干流凹岸,受河水侵蚀强烈,局部滑塌严重,形成下错陡坎(图13中P2),地形陡峭形成较好的临空面。形变剖面整体显示Ⅲ#滑坡中后部公路段形变速率较大,滑坡前缘、后缘形变速率次之。

#### 4.4 IV#滑坡形变结果

根据SBAS-InSAR探测结果,监测期内IV#滑坡最大形变速率达83.7 mm/a,滑坡中部及前缘形变较大(图15)。为分析IV#滑坡形变规律,沿D-D'剖面线在滑坡后缘、中部及前缘分别选取d1~d3共3处监测点绘制时间序列曲线。时间序列曲线(图9(d))显示,d1监测点形变曲线较为平缓,仅在2019年雨季后产生较明显波动,监测期内累积形变量为58.9 mm,目前仍处于缓慢变形阶段,未呈加速变形趋势;d2和d3监测点形变趋势基本保持相同,并且形变速率与降雨量具有较显著相关性。以d2点为例,随着2017-06—2017-10、2018-06—2018-10、2019-06—2019-10以及2020-06—2020-10雨季结束后,监测点明显加

速,其中在2018年雨季和2019年雨季后加速均较为明显。2018-11之前,监测点22个月累积形变量为72.8 mm,平均形变速率约39.7 mm/a,而在2018-11—2019-05,监测点累积形变量就高达73.7 mm,平均形变速率约126.3 mm/a,2019-11—2020-05,监测点累积形变量为53.1 mm,平均形变速率约91.0 mm/a。目前其形变曲线在雨季后仍呈现加速变形趋势。

为进一步分析IV#滑坡的变形破坏模式,选取D-D'剖面线绘制了形变速率剖面图(图16)。通过形变速率剖面图及现场调查发现,滑坡后缘发育一处汇水洼地(图15中P1),并在坡体多处发现泉点出露,表明坡体地下水较为丰富,该区域形变速率受强变形区影响,靠近强变形区部位形变速率越大;滑坡中部及前缘是军功古滑坡形变速率最大的区域,现场复核发现该区域变形强烈,公路边坡土体松散并发生垮塌(图15中P2),公路路面也可见明显的裂缝延伸,长度约5.3 m(图15中P3),滑坡坡体被多条深切冲沟所分割(图15中P4、P5),同时坡体前缘处于黄河干流凹岸,受河水侵蚀强烈,岸坡陡峭临空条件较好,发育有小型滑坡群(图15中P5)。公路部门在坡体中部路段已建有抗滑桩工程,但坡体形变依旧强烈,推测IV#滑坡强变形区存在次级滑面,已有抗滑桩未达到滑面深度。形变剖面整体显示,IV#滑坡中后部路段形变速率较大,滑坡前缘、后缘形变速率次之。

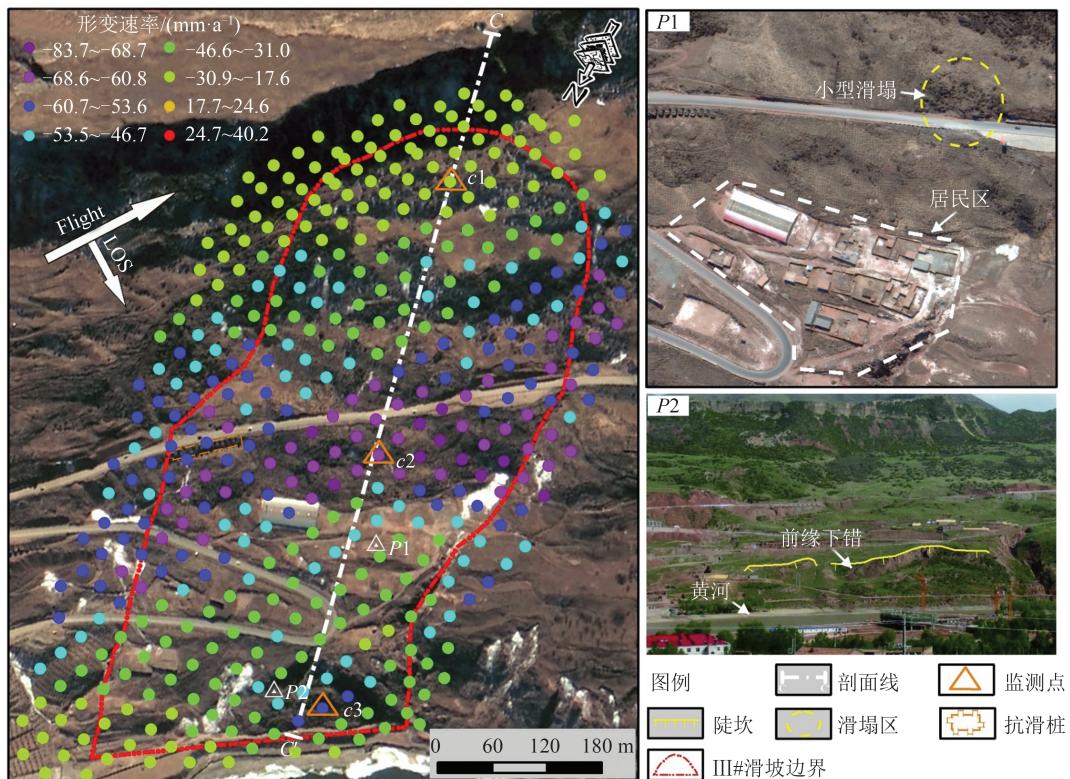


图13 III#滑坡年均形变速率及强变形区变形破坏迹象图

Fig. 13 Average Annual Deformation Velocity Rate of III# Landslide and the Signs of Deformation and Failure in the Strong Deformation Area

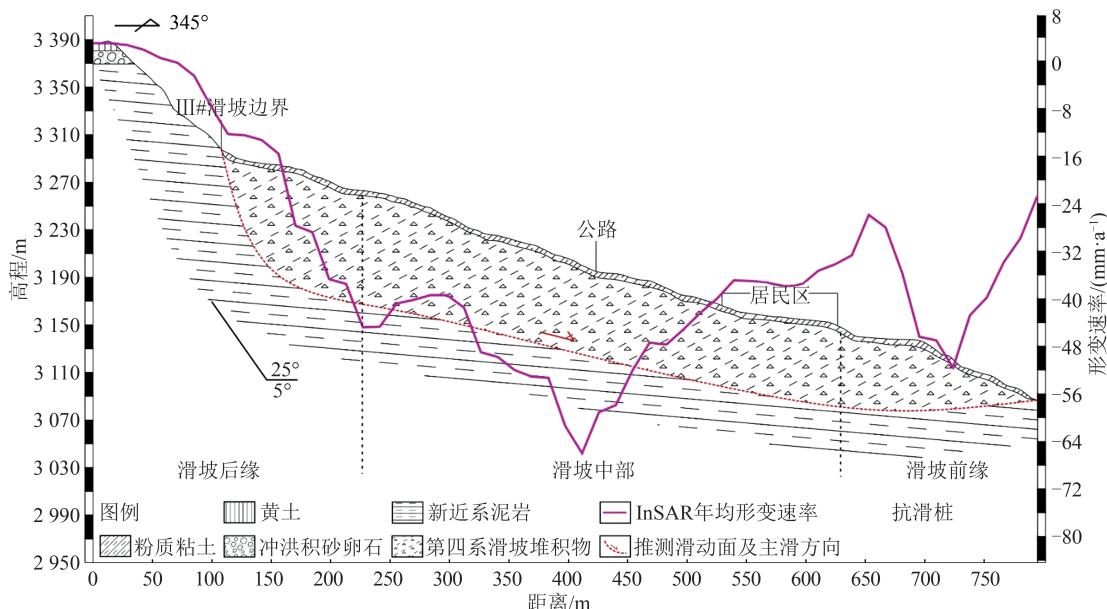


图14 III#滑坡C-C'剖面形变图

Fig. 14 C-C' Section Deformation Diagram of III# Landslide

#### 4.5 总体变形规律与趋势分析

根据SBAS-InSAR分析结果,发现军功滑坡各次级滑坡强变形区形变速率与降雨作用具有较好的响应关系,分析表明,在一年之内变形开始时间和雨季开始时间存在滞后效应,在每年雨季后坡体开始加速变形,总体形变开始时间在雨季开始后约4~5个月,直至来年5月—6月逐渐减小甚至趋

于稳定,2018年雨季后强变形区加速最为明显。各次级滑坡区的形变曲线显示,坡体的强变形区均位于公路开挖段,人类活动对古滑坡稳定性扰动较大,其中I#滑坡形变剖面显示坡体前缘形变远大于坡体后缘及中部,滑坡运动模式呈现牵引式,其余各次级滑坡形变剖面均显示坡体中后部形变较大,表明滑坡主要在重力作用下以推移运动为主。

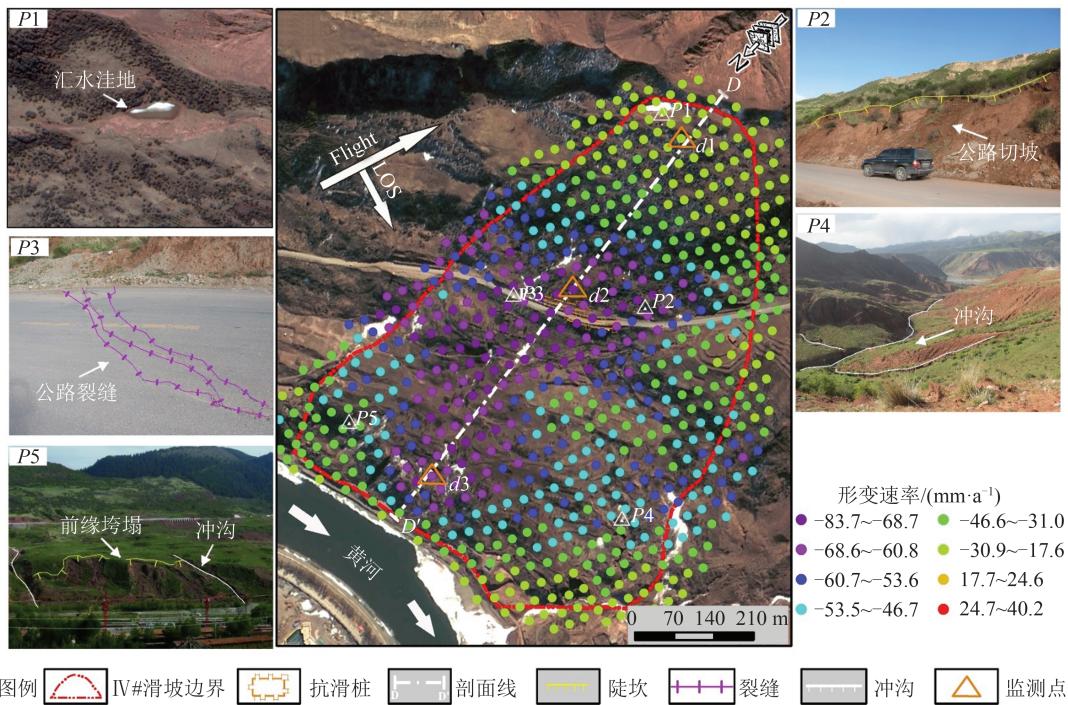


图 15 IV# 滑坡年均形变速率及强变形区变形破坏迹象图

Fig. 15 Average Annual Deformation Velocity Rate of IV# Landslide and the Signs of Deformation and Failure in the Strong Deformation Area

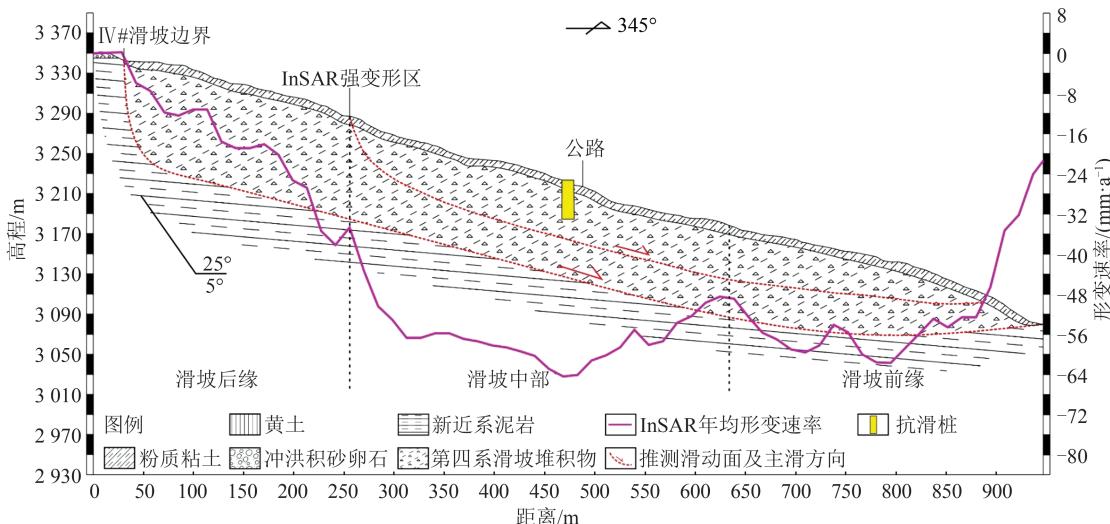


图 16 IV# 滑坡 D-D' 剖面形变图

Fig. 16 D-D' Section Deformation Diagram of IV# Landslide

结合现场调查,综合分析认为 I# 滑坡强变形区 I-1 的破坏主要受公路修建开挖坡脚影响,多期次光学影像及时序 InSAR 结果均显示 I-1 坡体后缘形变速率较大,表面滑坡运动模式为推移式。II# 滑坡强变形区 II-1 由于已做了治理工程,已建抗滑桩起到了一定抑制滑坡的作用,坡体仅在 2018 年雨季后加速变形。目前仅三道弯第一盘路和第二盘路中间区域仍处于持续形变中,分析认为其受人类活动影响较大,雨季的强降雨加速了坡体的变形,对下方的公路和居民造

成一定威胁。III# 滑坡的强变形区位于坡体中部及滑坡前缘,在监测时间段内,坡体中部累积形变量达 220.3 mm,坡体中部形变主要与人类活动和降雨相关,对省道 S101 正常通行造成一定威胁。其前缘强变形区主要受黄河侵蚀强烈,前缘滑塌严重,但规模相对较小。IV# 滑坡是军功古滑坡形变最大的区域,强变形区纵长约 640 m,宽约 300 m,目前仍然处于持续变形中。在监测时间段内,强变形区累计形变量高达 280.3 mm。综合分析认为,IV# 滑坡强变形受地下水、降雨以及

黄河干流侵蚀坡脚影响。Ⅳ#滑坡前缘处于黄河凹岸段,坡脚受河水侵蚀强烈,影响了坡体的稳定性。地下水在岩土体孔隙中运移、集中,不断对岩土体进行浸润软化作用,其抗剪、抗拉及抗压强度降低,雨季集中的强降雨又加速了坡体的形变。Ⅳ#滑坡目前也是相对危险的区域,一旦发生失稳,将会导致公路中断,堵塞黄河,将严重威胁当地居民正常生产生活,建议重点对该区域加强监测。

## 5 结语

本文综合利用高分辨率光学遥感影像、DEM 数据和雷达卫星 SBAS-InSAR 等综合遥感技术,结合现场调查,对军功古滑坡进行了变形区划分和地表形变规律分析,得到了以下主要认识:

1)军功古滑坡可分为 4 个次级滑坡,SBAS-InSAR 形变结果表明目前 4 个次级滑坡均处于持续的缓慢蠕滑状态,其中Ⅳ#滑坡是规模和形变速率最大的区域,累积形变量高达 280.3 mm,滑坡一旦发生失稳,将会导致公路中断,堵塞黄河,威胁当地居民正常生产生活,建议重点对该区域加强监测。

2)各次级滑坡区的形变剖面显示坡体的强变形区均位于公路开挖段,表明人类活动对古滑坡稳定性扰动较大。其中Ⅰ#滑坡形变剖面显示坡体前缘形变远大于坡体后缘及中部,滑坡运动模式呈现牵引式,其余各子滑坡形变剖面均显示坡体中后部形变较大,表明滑坡主要在重力作用下以推移运动为主。滑坡强变形区形变速率与降雨具有较好的响应关系,变形开始时间和雨季开始时间存在滞后效应,在每年雨季结束后坡体开始加速变形。

3)虽然古滑坡局部已进行了抗滑桩等工程治理,但由于古滑坡存在多级滑面,已有抗滑桩深度不够,虽发挥了一定的抗滑作用但尚未起到阻止滑坡整体蠕滑变形的作用,建议后续工程治理应利用钻探等技术手段查明多级滑面后再针对性进行设计。

4)本文基于 Sentinel-1 降轨雷达卫星影像,利用 SBAS-InSAR 技术查明了军功古滑坡的强形变区和长时间序列形变规律,未来可利用该技术方法进行古滑坡的持续中长期监测预警,但滑坡局部失稳往往可能在一次降雨过程中完成,Sentinel-1 雷达卫星重访周期为 12 d,较难捕捉到滑坡局部失稳前的加速变形信息,从而导致不能提

前预警。因此,建议在本文探测出的强形变区安装裂缝计等现场实时监测预警设备,结合雷达卫星 InSAR 中长期监测,实现对军功古滑坡点、面结合的监测预警。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Yongshuang, Wu Ruian, Guo Changbao, et al. Research Progress and Prospect on Reactivation of Ancient Landslides [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 728-740. (张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 古滑坡复活问题研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 728-740.)
- [2] Guo Changbao, Ni Jiawei, Yang Zhihua, et al. The Ancient Landslides Development Characteristics and Stability Evaluation Along the Luding Section, Dadu River, Western Sichuan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 1981-1991. (郭长宝, 倪嘉伟, 杨志华, 等. 川西大渡河泸定段大型古滑坡发育特征与稳定性评价[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 1981-1991.)
- [3] Guo Changbao, Ren Sanshao, Li Xue, et al. Development Characteristics and Reactivation Mechanism of the Jiangdingya Ancient Landslide in the Nanyu Town, Zhouqu County, Gansu Province [J]. *Geoscience*, 2019, 33(1): 206-217. (郭长宝, 任三绍, 李雪, 等. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 206-217.)
- [4] Zhang Haiquan, He Wenxiu, Zhao Bo, et al. Analysis of Field Investigation and Monitoring of “6.17” Meilong Valley Debris Flow-Aniangzhai Landslide Disaster Chain in Danba County, Sichuan Province [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12481-12489. (张海泉, 何文秀, 赵波, 等. 四川丹巴县“6.17”梅龙沟泥石流-阿娘寨滑坡灾害链现场调查与监测分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12481-12489.)
- [5] Tao Guoxin, Hong Wenzhi. The Harm of Landslide to Ningguo Highway and Countermeasures [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1995, 22(5): 29-31. (陶国新, 洪文之. 滑坡对宁果公路的危害及防治对策[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(5): 29-31.)
- [6] Wang Xiufeng, Wang Wenzu. Deformation Mechanism Analysis of Jungong 1# Landslide on Xijiu Highway [J]. *Qinghai Transportation Science and Technology*, 2008(6): 53-54. (王秀凤, 王文祖. 西久公路军功 1#滑坡变形机理分析[J]. 青海交通科技, 2008(6): 53-54.)
- [7] Cheng Keli, Bai Huilin, Fang Hongyu. Study on Deformation and Failure Characteristics and Mecha-

- nism of Jungong Landslide in Qinghai Province [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2021, 57(1): 45–51. (程柯力, 白慧林, 方宏宇. 青海省军功滑坡变形破坏特征及机理研究 [J]. 甘肃水利水电技术, 2021, 57(1): 45–51.)
- [8] Dai Keren, Zhuo Guanchen, Xu Qiang, et al. Tracing the Pre-failure Two-Dimensional Surface Displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with Radar Interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1778–1786. (戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1778–1786.)
- [9] Feng Wenkai, Dun Jiawei, Yi Xiaoyu, et al. Deformation Analysis of Woda Village Old Landslide in Jinsha River Basin Using SBAS-InSAR Technology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 384–393. (冯文凯, 聂佳伟, 易小宇, 等. 基于SBAS-InSAR技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 384–393.)
- [10] Yan Yiqiu, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, et al. Study of the Deformation Characteristics of the Xiongba Ancient Landslide Based on SBAS-InSAR Method, Xizang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3556–3570. (闫怡秋, 郭长宝, 张永双, 等. 基于SBAS-InSAR技术的西藏雄巴古滑坡变形特征 [J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3556–3570.)
- [11] Dai C, Li W L, Wang D, et al. Active Landslide Detection Based on Sentinel-1 Data and InSAR Technology in Zhouqu County, Gansu Province, Northwest China [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(5): 1092–1103.
- [12] Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, Zhang Qin, et al. Research on Loess Landslide Identification, Monitoring and Failure Mode with InSAR Technique in Heifangtai, Gansu [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 996–1007. (赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡InSAR识别、监测与失稳模式研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 996–1007.)
- [13] Dai K R, Li Z H, Xu Q, et al. Entering the Era of Earth Observation-based Landslide Warning Systems: A Novel and Exciting Framework [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(1): 136–153.
- [14] Meng Q K, Li W L, Raspini F, et al. Time-Series Analysis of the Evolution of Large-Scale Loess Landslides Using InSAR and UAV Photogrammetry Techniques: A Case Study in Hongheyuan, Gansu Province, Northwest China [J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 251–265.
- [15] Li Weile, Xu Qiang, Lu Huiyan, et al. Tracking the Deformation History of Large-Scale Rocky Landslides and Its Enlightenment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1043–1053. (李为乐, 许强, 陆会燕, 等. 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), 2019, 44(7): 1043–1053.)
- [16] 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. (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.)
- [17] Liu Xiaoyi, Yang Zhihua, Guo Changbao, et al. Study of Slow-Moving Landslide Characteristics Based on the SBAS-InSAR in the Xianshuuhe Fault Zone [J]. *Geoscience*, 2017, 31(5): 965–977. (刘筱怡, 杨志华, 郭长宝, 等. 基于SBAS-InSAR的鲜水河断裂带蠕滑型滑坡特征研究 [J]. 现代地质, 2017, 31(5): 965–977.)
- [18] Mo Yujuan, Wu Yang, Liu Xuewu. Monitoring the Ground Subsidence in Xiaojin County, Sichuan Province Based on Small Baseline Subset Technique [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2018, 27(11): 46–50. (莫玉娟, 吴洋, 刘学武. 基于SBAS技术的四川阿坝州小金县地表形变监测 [J]. 测绘工程, 2018, 27(11): 46–50.)
- [19] Yao J M, Lan H X, Li L P, et al. Characteristics of a Rapid Landsliding Area Along Jinsha River Revealed by Multi-temporal Remote Sensing and Its Risks to Sichuan-Tibet Railway [J]. *Landslides*, 2022, 19(3): 703–718.
- [20] 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. (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.)
- [21] Lin Jianguo. Brief Discussion on Emergency Protection Plan for Landslides in Jungong Mountain Sec-

- tion of G227 Line [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 15(10): 102-103. (林建国. G227 线军功山段山体滑坡应急保通方案浅谈[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(10): 102-103.)
- [22] Li Xiaolin, Ma Jianqing, Zhang Tingting, et al. Analysis of the Distribution Features of Large Landslides in Qinghai and the Influencing Factors [J]. *Urban Geology*, 2008, 3(4): 26-30. (李小林, 马建青, 张婷婷, 等. 青海省特大滑坡分布特征及影响因素[J]. 城市地质, 2008, 3(4): 26-30.)
- [23] Hu Guishou, Wu Wenxin, Wei Gang. Analysis of the Distribution Features of Large Landslides in Qinghai and the Influencing Factors [J]. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, 2008 (6): 40-43. (胡贵寿, 吴文新, 魏刚. 青海省特大型滑坡基本类型和发育分布特征[J]. 青海国土经略, 2008(6): 40-43.)
- [24] Ma Huanyuan, Yang Zhanxiang, Shen Guoying, et al. Qinghai Province, Machin County, Lajia Town, Quwa Jiasa (Jungong) Landslide Survey and Design Book [R]. Qinghai: Qinghai Hydrogeology and Engineering Geology and Environgeology Survey Institute Engineering Branch, 2013:6-17. (马还援, 杨占祥, 沈国英, 等. 青海省玛沁县拉加镇曲哇加萨(军
- 功)滑坡勘察设计书[R]. 青海: 青海省水文地质工程地质环境地质调查院工程分院, 2013:6-17.)
- [25] Dai Keren. Integration of New Generation SAR Data for Extracting the Earth's Surface Topography and Displacement: Methodology and Modelling [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (戴可人. 融合新一代卫星 SAR 数据的地形与形变信息提取模型与方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.)
- [26] Shi X G, Yang C, Zhang L, et al. Mapping and Characterizing Displacements of Active Loess Slopes Along the Upstream Yellow River with Multi-temporal InSAR Datasets [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 674: 200-210.
- [27] Kang Ya. Landslide Detection and Monitoring over Southwestern Mountainous Area with InSAR [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (康亚. InSAR 技术在西南山区滑坡探测与监测的应用[D]. 西安: 长安大学, 2016.)
- [28] Shi Gulin, Xu Lang, Zhang Xuanyu, et al. Monitoring Time Series Deformation of Xishancun Landslide with SBAS-InSAR [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(2): 93-98. (石固林, 徐浪, 张璇钰, 等. 西山村滑坡时序形变的 SBAS-InSAR 监测[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 93-98.)

(上接第 1406 页)

- [66] Liu Weizheng, Xu Linrong, Zuo Shen, et al. Influence of Pile-Raft Foundation Reinforcement on Subgrade of Adjacent Existing Railway [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(3): 16-26. (刘维正, 徐林荣, 左坤, 等. 桩筏地基加固对紧邻既有线路基的影响[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 16-26.)
- [67] Kromer R A, Hutchinson D J, Lato M J, et al. Identifying Rock Slope Failure Precursors Using LiDAR for Transportation Corridor Hazard Management [J]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 93-103.
- [68] Wu Wenbo, Zhang Guohui, Liang Hongwu, et al. Research on Landslide Monitoring System Using Automatic Total Station [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(S1): 412-413. (武文波, 张国辉, 梁洪武, 等. 采用全自动全站仪的滑坡监测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S1): 412-413.)
- [69] Jia C, Yang X, Wu J, et al. Monitoring Analysis and Numerical Simulation of the Land Subsidence in Linear Engineering Areas [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(7): 2674-2689.
- [70] Quang L H, Loi D H, Sassa K, et al. Susceptibility Assessment of the Precursor Stage of a Landslide Threatening Haivan Railway Station, Vietnam [J]. *Landslides*, 2018, 15(2): 309-325.
- [71] Košt'ák B. Deformation Effects in Rock Massifs and Their Long-Term Monitoring [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2006, 39(3): 249-258.
- [72] Cheng Y K, Shi Z W. Permanent Deformation and Temperature Monitoring of Subgrades Using Fiber Bragg Grating Sensing Technology [J]. *Journal of Sensors*, 2021, 2021: 8824058.
- [73] Bai M Z, Chen Y, Wang C L, et al. Radar Spectral Analysis and Evaluation of the Effect of Grouting Treatment in Karst Caves and Soil Caves [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(24): 795.
- [74] Kuo C P, Hsu C H, Wu C W, et al. Study on the Mechanism and Inspection Method of Railway Pumping [C]//Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Greece, Athens, 2017.
- [75] He Y, Li Y, Xu L. An Integrated Multisource and Multiscale Monitoring Technique for Assessing the Health Status of High-Speed Railway Subgrade [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(11): 1972.