引文格式:王磊,吕广涵,杜建涛,等.黄河上游玛沁段活动滑坡InSAR探测与时空特征分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2226-2235.DOI:10.13203/j.whugis20240490

Citation:WANG Lei,LÜ Guanghan,DU Jiantao,et al.InSAR Detection and Spatiotemporal Characteristics of Active Landslides in the Maqin Section of the Upper Yellow River[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2226-2235.DOI:10.13203/j.whugis20240490

黄河上游玛沁段活动滑坡InSAR探测与时空特征分析

王 磊[1] 吕广涵[2] 杜建涛[3] 朱冀涛[1] 赵光俊[2] 王德友[1] 傅 宁[2]

1 国网辽宁省电力有限公司,辽宁 沈阳,110004

2 国网思极位置服务有限公司,北京,102209

3 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

摘 要:滑坡作为黄河上游普遍存在的地质环境灾害现象,严重制约黄河流域生态保护和高质量发展。基于升、降轨时序合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)测量获取的地表形变速率和时间序列,开展黄河上游玛沁段的活动滑坡空间分布与军功巨型滑坡的时空演化特征分析。研究结果表明,黄河上游玛沁段发育活动滑坡124处,主要集中在黄河干流的两岸边坡,其聚集发育与黄河的长期下切和侵蚀作用密切相关。军功滑坡的三维形变揭示出该滑坡在空间上具有显著的不均匀形变特征,且水平向形变速率大于垂直向。独立成分分析进一步揭示了军功滑坡在不同区域表现出时空演化特征的差异性,表明了军功滑坡形变机理的复杂性。基于独立成分的层次聚类将军功滑坡分为3个活动区域,分别反映了滑坡不同的演化规律和风险等级。该研究不仅为黄河上游滑坡灾害的管理和防治提供了科学依据,同时也为类似地质灾害的监测和分析提供了新的思路和方法。

关键词:黄河上游;滑坡;合成孔径雷达干涉;三维形变;独立成分分析

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-25

DOI:10.13203/j.whugis20240490 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2226-10

InSAR Detection and Spatiotemporal Characteristics of Active Landslides in the Maqin Section of the Upper Yellow River

WANG Lei[1] *LÜ Guanghan*[2] *DU Jiantao*[3] *ZHU Jitao*[1] *ZHAO Guangjun*[2]
WANG Deyou[1] *FU Ning*[2]

1 State Grid Liaoning Electric Power Supply Co. Ltd, Shenyang 110004, China

2 State Grid Location Based Service Co. Ltd, Beijing 102209, China

3 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: For a long time, landslides, as geological hazards, have been significant factors influencing the ecological environment, landform evolution, and even the pattern of human settlement in the upper Yellow River basin. Studying the spatial distribution patterns and temporal evolution mechanisms of active landslides can help provide a scientific basis for the management and prevention of landslide hazards in the upper Yellow River. Simultaneously, it promotes the engineering application of radar remote sensing technology in landslide research, offering new ideas and methods for monitoring and analyzing similar geological hazards. **Methods**: First, based on 358 ascending and descending Sentinel-1 images spanning from January 2017 to July 2023, the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique was employed to obtain the surface deformation rates and time series in the study area. Subsequently, active landslides were interpreted and mapped by integrating InSAR velocities, optical imagery, and topo-

基金项目:陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队(2022)。

第一作者:王磊,工程师,研究方向为数据智能化处理。lnsgwanglei@163.com

通信作者:杜建涛,博士。jiantao.du@chd.edu.cn

graphic data. Finally, a three-dimensional deformation model constrained by topographic factors was utilized to obtain the true deformation field of the Jungong landslide. Additionally, independent component analysis and hierarchical clustering methods were introduced to investigate the spatiotemporal evolution characteristics of the Jungong landslide. **Results:** There are 124 active landslides developed in the Maqin section of the upper Yellow River, primarily concentrated on the slopes on both sides of the main stream, with more landslides occurring on the right bank than on the left. As a typical case, the Jungong landslide has undergone considerable surface deformation over the past few years, with horizontal movement being the dominant type of sliding. The surface deformation of the Jungong landslide exhibits spatially uneven distribution and significant variability in temporal evolution, which are related to the formation process and geological background of the landslide. Based on the distribution results of independent components, the landslides are clustered into three active zones, revealing different deformation patterns and risk levels. **Conclusions:** The concentrated occurrence of active landslides in the Maqin section of the upper Yellow River is related to the local landform changes caused by the long-term undercutting and erosion of the Yellow River. Specific areas of the Jungong landslide exhibit accelerated deformation, posing a risk of localized collapse, and thus require long term monitoring.

Key words: the upper Yellow River; landslide; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); three-dimensional deformation; independent component analysis (ICA)

黄河上游具有地质构造复杂和生态环境脆弱的特点,孕育了以滑坡为代表的地质环境灾害,这些灾害分布范围广、突发性强、致灾后果严重,严重制约着黄河流域的生态保护和高质量发展[1]。因此,开展黄河上游流域的滑坡探测和监测研究不仅承载着服务国家长远发展战略需求的深远意义,而且,有助于揭示滑坡灾害的分布规律,探究其成灾机理。

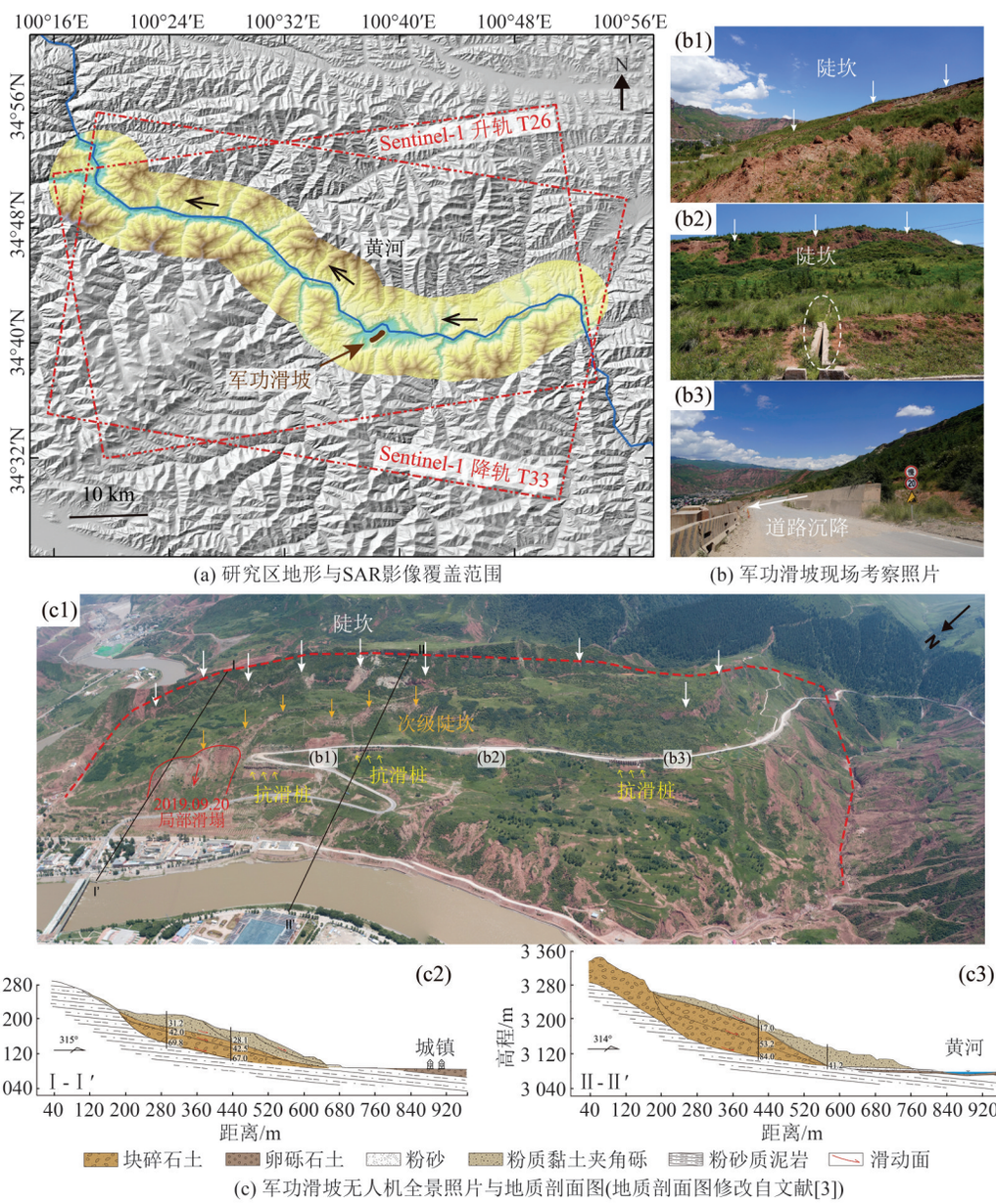
青海省玛沁县和同德县交界河段呈现高山峡谷地貌,河道两岸孕育了包括军功巨型滑坡在内的多处不稳定滑坡体,对沿岸的村庄、道路等基础设施和人民的生命安全造成重大威胁。近年来,沿岸滑坡的活动性加强,并伴随局部失稳的风险。例如,军功滑坡前缘在 2019-09-20 发生局部滑塌,造成道路阻断,居民受损。李春阳等[2]基于现场考察成果分析了军功滑坡的变形特征和形成条件,并用传递系数法开展滑坡稳定性评价,表明近期活动迹象都为老滑坡局部形成的新滑坡,在暴雨、地震等条件下表现出不稳定状态,同时认为军功滑坡预警等级较高,需要及时开展防治措施。程柯力等[3]根据野外地质调查、室内试验和数值模拟,分析了军功滑坡的变形特征和机理,认为独特的岩土构成和人类工程活动是滑坡形成的主要原因,而降雨和冻融作用则加速了滑坡的变形破坏。陈宝林等[4]结合现场勘察、卫星影像和地形数据,分析了军功滑坡的形态和形变特征,揭示了滑坡的形变演化规律,为滑坡的工程治理和监测预警提供参考。这些研究为深入理解滑坡的基本特性和变形机制提供了支撑。然而,关于该河段滑坡的大范围识别和精细化监测研究仍十分缺乏,导致研究区的滑坡空间分布不明,时空演化机理不清。

地表形变作为滑坡活动特征的直观体现,是滑坡大范围识别的一个关键性指示信号。传统测量手段是开展野外调查的必要工作,但是对于滑坡的大范围探测和长期连续监测则显得无能为力。合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)测量技术过去几十年得到了飞速发展,该技术因其大范围、全天候、非接触等优势成为滑坡灾害识别和监测应用的有效手段[5-7]。丰富的卫星影像数据以及各种先进的时序分析算法和测量误差改进技术,进一步提升了滑坡研究的应用范围和可靠性,颠覆了传统滑坡野外调查需要消耗巨大人力和物力的局面,使得低成本的滑坡广域识别成为可能,也可以追溯滑坡的历史形变规律[8]。InSAR 技术已被广泛用于金沙江流域[9-10]、三峡库区[11]、大渡河流域[12]等研究区的滑坡识别和监测研究中。然而,在实际应用中,InSAR 测量仍面临如下挑战,一方面,InSAR 获取的是雷达视线向(line of sight, LOS)的一维形变,这一特征不仅会导致滑坡灾害点的漏判,而且制约了滑坡真实形变场的恢复,如何揭示滑坡真实的三维形变成为 InSAR 研究的重点和难点问题;另一方面,InSAR 观测反映的是地表可能发生的多种形变信号的集中体现,这对于揭示形变机理是十分不利的。一种可靠的思路是对 InSAR 形变进行有效的分解,从而进一步分析不同分量的形变模式及影响因素。

本文基于2017-01—2023-07期间的358景升、降轨Sentinel-1影像,采用小基线集(small baseline subset, SBAS)时序分析方法生成了黄河上游玛沁段地表年形变速率及时间序列,进一步获取了军功滑坡的三维形变场,然后,采用独立成分分析方法(independent component analysis, ICA)对军功滑坡地表形变时间序列中的不同时空形变模式进行分离,最后,对研究区的滑坡空间聚集特征和军功滑坡的时空演化规律进行分析和讨论。

1 研究区概况

黄河上游玛沁县和同德县交界河段具有复杂多样的地质地貌背景,该研究区位于中国青藏高原第一阶梯地貌,区内山峦重叠,峡谷交错,平均海拔约4 100 m,见图1(a)。



(a) 研究区地形与SAR影像覆盖范围

(b) 军功滑坡现场考察照片

(c) 军功滑坡无人机全景照片与地质剖面图(地质剖面图修改自文献[3])

图1 研究区

Fig. 1 The Study Area

黄河在上游段的水流湍急,导致河床深切,形成了诸多峡谷和险滩。独特的高山峡谷地貌为滑坡的形成提供了有力条件,其中位于拉加盆地南缘的军功滑坡因其巨大的滑动方量和潜在风险最为典型,该滑坡位于东昆仑活动断裂带上,滑坡北侧发育的拉加寺断层是玛沁断裂的分支,沿北东60°方向延伸,属于压扭性逆断层。军功滑坡坐落在黄河南岸,呈北东-南西走向,高程3 060~3 330 m,滑坡最宽2 500 m,长度800~900 m,估计方量约1.67亿m^3,主滑方向约300°,坡度25°~36°。滑坡东、南侧后壁

明显,呈陡坡状,局部出现陡崖。在2023-07的野外考察中获取的无人机影像可以清晰地看到滑坡的全貌(图1(c1))。另外,现场可看到滑坡后缘出现比较新鲜的陡坎、挤压后的排水渠和挡土墙以及弯曲的公路(图1(b))。沿剖线Ⅰ-Ⅰ′和Ⅱ-Ⅱ′的地质剖面图显示军功滑坡发育多层滑动面和多个中小型浅层次级滑坡(图1(c2)、1(c3))。滑坡所在区域的上覆第四纪岩性为上更新统冲洪积粉土及卵石,主要分布在滑坡后缘黄河阶地,滑坡沉积区的地层年代为全新统,主要是碎石土及粉质黏土夹角砾,下伏基岩主要为新近系,岩性为红色-橘红色泥岩,层间夹有灰白色的薄层石膏。研究区为高原大陆性气候,受西南和东南湿润气流影响,呈现半湿润高寒气候特征,多年平均降雨量在420~560 mm之间,集中在6月—10月,占全年降雨量80 %以上。

2　研究方法

本文采用的技术流程如图2所示,包括InSAR形变获取、滑坡广域分析和单体滑坡研究。共采用358景干涉宽幅模式的Sentinel-1影像,其中169景来自升轨数据集,轨道号为T26,189景来自降轨数据集,轨道号为T33。时间跨度均为2017-01—2023-07。裁剪后的影像覆盖范围如图1(a)所示。位移速率和时间序列分析采用SBAS-InSAR技术。为了尽可能减小时间去相关的影响,每个影像仅与其相邻的3个影像进行干涉组合,从而生成小基线集。为了确保滑坡形变监测的空间分辨率,影像干涉时采用了4×1的多视因子,从而产生在方位向和距离向上均为15 m大小像素的干涉图。美国航天飞机雷达地形任务(shuttle radar topography mission, SRTM)生成的30 m分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)用来模拟和去除地形相位以及地理编码。经过仔细检查干涉质量,升、降轨数据集分别保留了386和477幅干涉图用于InSAR时间序列分析,高质量干涉组合的时空基线如图3所示。最后,通过最小二乘来解算地表形变的年平均速率和时间序列。

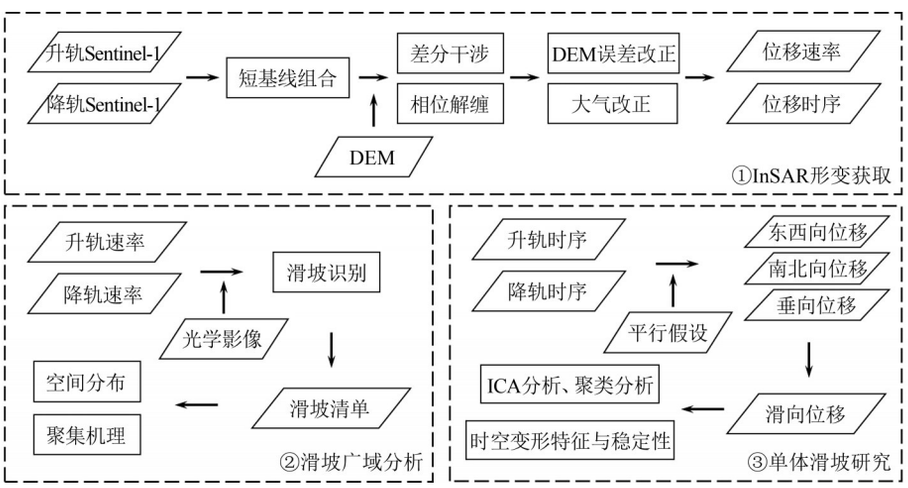


图2　研究技术流程图

Fig. 2　Technology Flowchart of Research

尽管升、降轨数据集提供了来自两个不同观测视角的地表变形场,但InSAR获取的是地表变形在LOS方向上的投影,这并不能反映滑坡的真实形变[13]。恢复地表三维InSAR变形场对于揭示滑坡的运动模式和失稳机制至关重要。由于近极轨迹对朝向北/南方向的变形不敏感,即便使用3个以上具有不同轨道几何的SAR数据集求解三维速度向量也会非常不可靠。对于滑坡而言,一个可靠的先验信息是,受到重力影响,滑坡物质往往在某个方向沿坡面向下移动,研究表明,基于坡向平行流模型的滑坡三维形变反演具有很高的可靠性[14-15]。因此,本文采取该模型对军功滑坡的三维形变场进行恢复,滑坡三维形变分解模型见图4。首先,InSAR获取的测量值d_L是表面位移在雷达LOS方向上的投影:

$$d_L = l\begin{bmatrix} d_N \\ d_E \\ d_U \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$l=\begin{bmatrix}\sin\varphi\sin\alpha & -\sin\varphi\cos\alpha & \cos\varphi\end{bmatrix}$是南北向($d_N$)、东西向($d_E$)和垂向($d_U$)的矢量分量;$\varphi$是雷达入射角;$\alpha$是卫星飞行的航向角。

当有两个独立的LOS观测量时(升轨、降轨),并在坡向平行流的假设下,构建三维速度场解算方程,同时忽略横坡方向上的运动($v=0$):

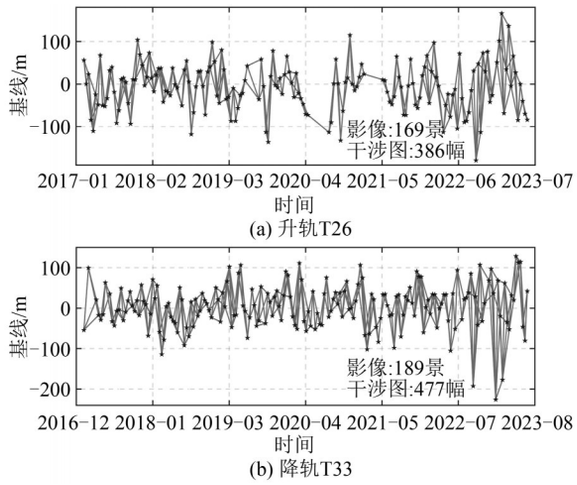


图3 干涉组合的时空基线分布图

Fig. 3 Spatial-Temporal Baseline Distribution of the Interferometric Pairs

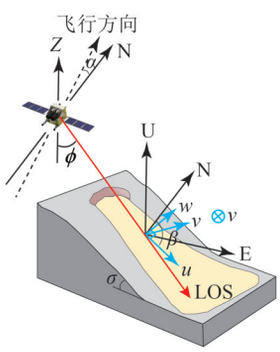


图4 滑坡三维形变分解模型示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Three-Dimensional Deformation Decomposition Model for Landslide

$$\begin{bmatrix} d_{\text{L-S1A}} \\ d_{\text{L-S1D}} \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{\text{S1A}} \\ l_{\text{S1D}} \\ s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{\text{N}} \\ d_{\text{E}} \\ d_{\text{U}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,$s=\begin{bmatrix}\sin\beta & -\cos\beta & 0\end{bmatrix}$,代表坡向、法向、横向坐标系下的单位矢量;$\beta$为斜坡的坡向。式(2)中的未知数即可直接求解。LOS方向的观测值可以通过下式投影到真实的滑动方向上:

$$d_s=\frac{d_L}{l\begin{bmatrix}\cos\theta\sin\beta & \cos\theta\cos\beta & \sin\theta\end{bmatrix}^{\text{T}}} \tag{3}$$

式中,θ为真实滑动方向和水平面的夹角。坡向因子由30 m分辨率的SRTM DEM数据生成。

3 结果与分析

3.1 黄河上游玛沁段InSAR速率与活动滑坡分布

基于升、降轨Sentinel-1数据获取的黄河上游玛沁段LOS向InSAR地表形变速率如图5(a)、5(b)所示,图中红色表示地表运动方向远离卫星,蓝色表示地表运动方向靠近卫星。可以看出,该河段的大部分区域比较稳定,较明显的形变信号集中出现在黄河沿岸。根据形变速率、地形及光学影像,图中表现出的明显形变信号几乎都可判定活动滑坡。另外,部分升、降轨中的形变信号出现了方向相反的现象,这与雷达的入射角和地表坡度有关,也反映出利用多轨道观测进行滑坡解译的必要性。最后,本文在该区段共识别活动滑坡124个,滑坡在空间上的分布如图5(c)所示,其中位于拉加镇南侧的形变区域即为军功巨型滑坡体(图5(c)中红色方框区域),后文将对该滑坡的形变时空特征进行详细研究。

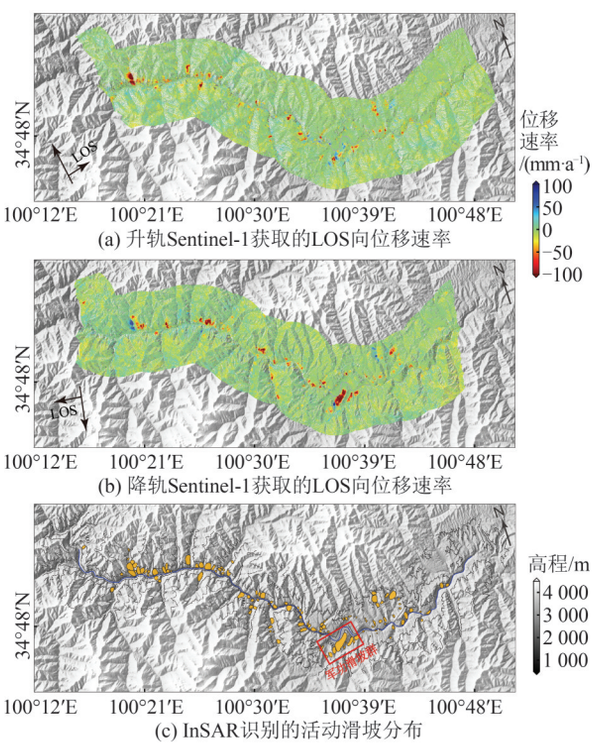
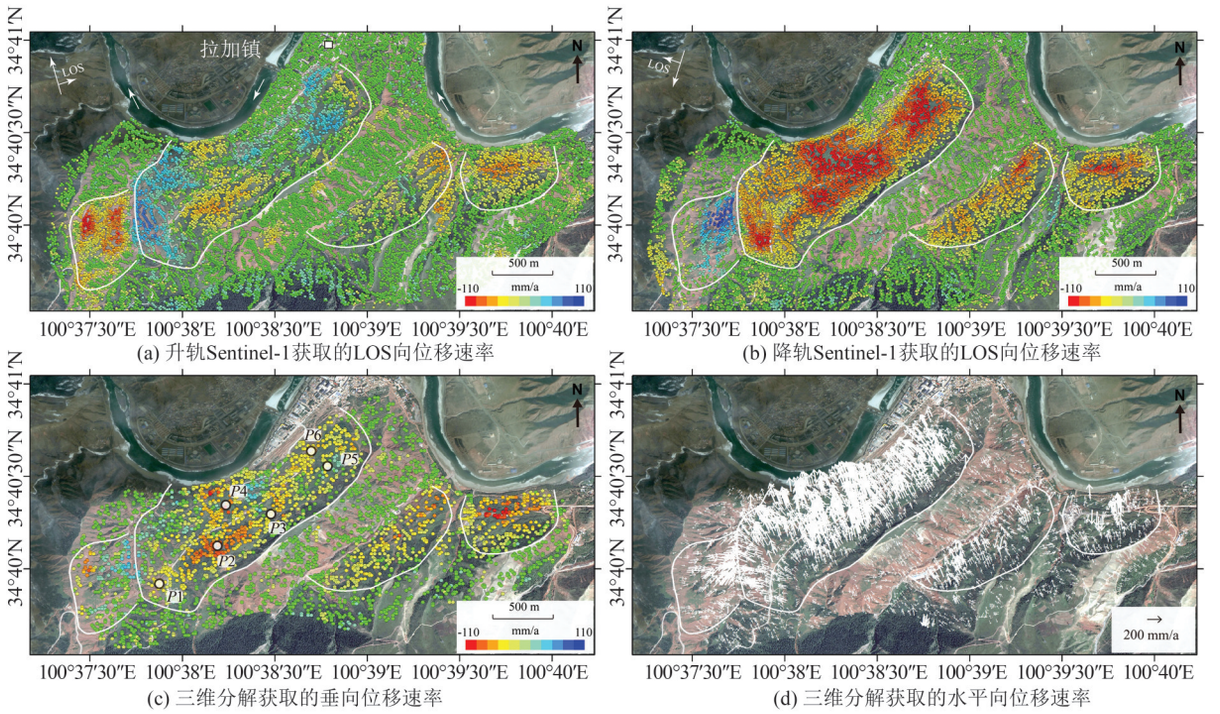


图5 黄河上游玛沁段InSAR速率图与活动滑坡分布

Fig. 5 InSAR Velocities and Active Landslides Distribution in the Maqin Section of the Upper Yellow River

3.2 军功滑坡三维形变场

拉加镇区域的升、降轨LOS向地表形变速率放大显示分别见图6(a)、6(b)。相比升轨数据,降轨数据具有更好的观测视角,因此获取的观测结果更能反映出滑坡的形态特征。尽管如此,不同观测视角下的巨大形变差异表明,仅仅依靠单个轨道的观测无法揭示滑坡的真实形变。根据前文提出的方法获取军功滑坡的三维形变速率见图6(c)、6(d),箭头矢量反映了形变的方向和量级。整体而言,军功滑坡的水平向形变要明显大于垂向形变。另外,滑坡体的形变在空间上也呈现不均匀分布的特点,这也表明了军功滑坡是一个基底较为复杂的活动滑坡体。



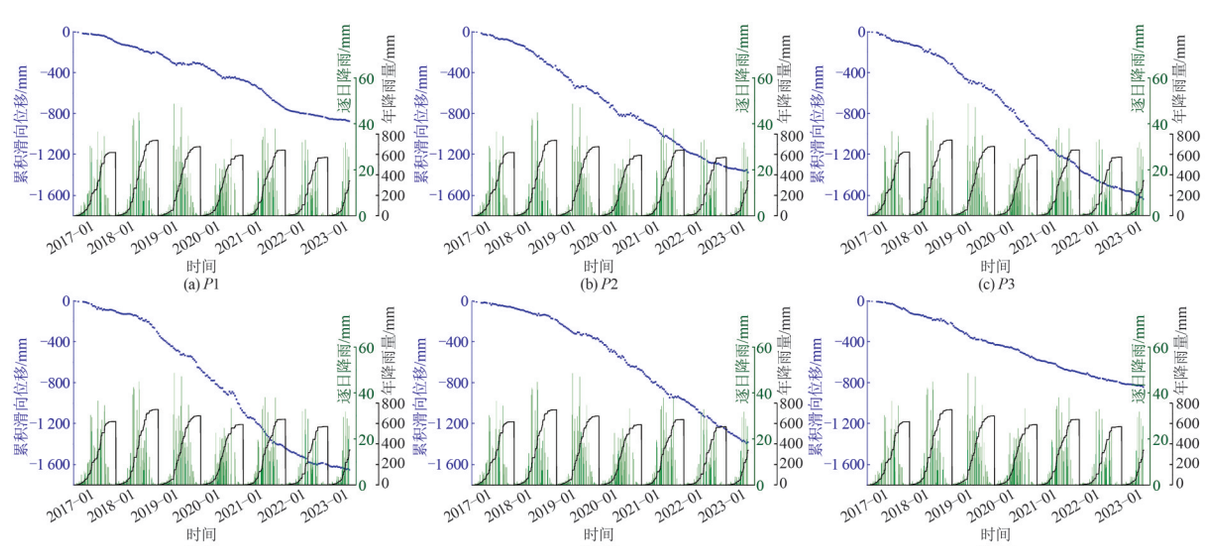
(a) 升轨Sentinel-1获取的LOS向位移速率　(b) 降轨Sentinel-1获取的LOS向位移速率

(c) 三维分解获取的垂向位移速率　(d) 三维分解获取的水平向位移速率

图 6　军功滑坡 InSAR 地表形变速度场

Fig. 6　InSAR Deformation Velocities of the Jungong Landslide

基于三维形变场,本文获取了军功滑坡的真实滑动方向,并在滑坡体上提取特征点 $P1$～$P6$ 绘制沿滑动方向上的位移时间序列见图 7。点 $P1$ 位于滑坡右侧边坡,监测期间的累计滑向位移 −837 mm,其时序演化以线性为主,并伴有季节性形变特征;点 $P2$、$P3$、$P4$ 位于滑坡中部形变较大的区域,其中点 $P2$、$P3$ 位于滑坡后缘,点 $P4$ 靠近滑坡坡脚,3 个点的位移时间序列表现出先加速后趋于缓和的特征,累积滑向位移分别为 −1 375 mm、−1 640 mm 和 −1 651 mm;点 $P5$ 和 $P6$ 分别位于滑坡左侧的后缘的坡脚处,累积滑向位移分别为 −1 380 mm 和 −840 mm,但二者的时间序列表现出完全不同的特征,点 $P5$ 在 2019 年的强降雨之后滑动速度明显加快,而点 $P6$ 的滑动速度有所减小,推测可能与 2019-09-20 发生的局部滑塌事件有关。这些特征点的时间序列特征表明军功滑坡的不同区域在时间上通过提取特征点的方式并不能反映这些差异性的全貌。因此,本文引入 ICA 来进一步揭示军功滑坡的形变时空特征。



(a) $P1$　(b) $P2$　(c) $P3$

(d) $P4$　(e) $P5$　(f) $P6$

图 7　军功滑坡特征点在滑动方向的位移时间序列

Fig. 7　Displacement Time Series in the Sliding Direction of Feature Points on Jungong Landslide

3.3 军功滑坡形变ICA分析

在InSAR时间序列的分析场景中,ICA通常用来做时间上和空间上两种分解模式,二者之间的主要区别在于处理的信号维度和目标对象不同。时间ICA的目标是从时间序列数据中分离出独立的时间信号成分,通常应用于单个或多个信号通道。空间ICA的目标是从空间数据中分离出独立的空间成分,通常用于多通道数据,目的是找到在空间上相互独立的源信号[16-17]。本文采用空间ICA分析揭示滑坡的时空分布特征。在进行ICA分解之前,首先要对经过中心化处理后的滑坡滑向位移时间序列进行主成分分析(principal component analysis,PCA),目的在于降低位移时间序列数据的维度,同时要尽可能多地保留原始信号的特征。经过PCA分解得到滑坡时间序列矩阵的特征值排列,前5个主成分分别占数据总方差的97.9%、0.99%、0.72%、0.28%和0.08%。本文保留了前3个分量,反映了原始数据99.61%的变化特征。图8显示了经过ICA处理后的3个独立分量(IC1、IC2、IC3)标准化后的空间分布和对应的混合矩阵时间序列,其中空间分布展示了具有相同时序演化趋势的观测点集合,不同的量级表示变化的幅度,对应的混合矩阵则反映了独立信号在不同时间的贡献。IC1主要分布在滑坡左侧大部分区域和右侧部分坡体,形变模式由慢速滑动转为快速滑动,加速拐点出现且在时间序列中伴有局部震荡信号。IC2主要分布在滑坡中部的大部分区域,其时间特征可大致分为三段:前期稳定阶段,时间为2017-01—2018-03;快速活跃阶段,时间为2018-03—2022-01;后期稳定阶段,时间为2022-01—2023-03。IC3则分布在除IC1和IC2之外的大部分区域,包括滑坡左侧的前缘和中部的后缘,形变模式由前期的缓慢加速滑动转向稳定,这一变化出现在2019年雨季之后。此外,IC3的空间分布中显示了2019年发生的局部滑动区域,该现象没有表现在原始的InSAR观测结果,这表明ICA分解有助于揭示滑坡的时空特征。

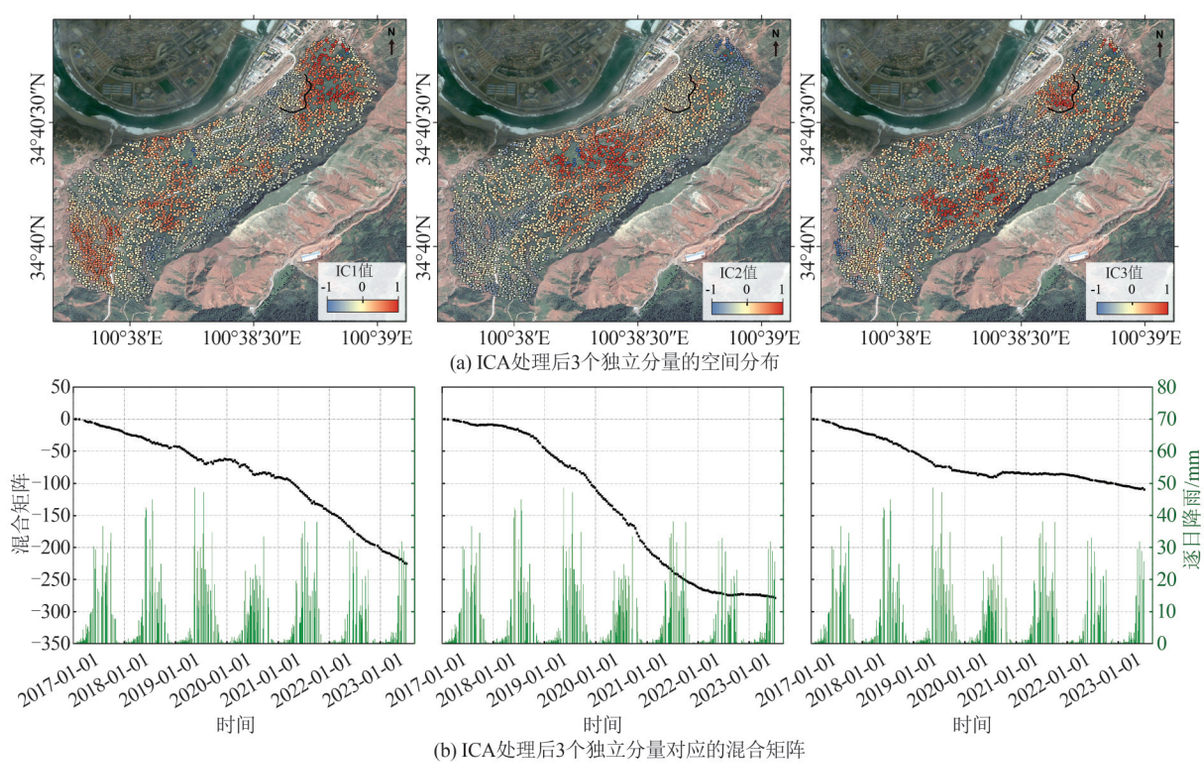


图8 军功滑坡形变的ICA分解结果

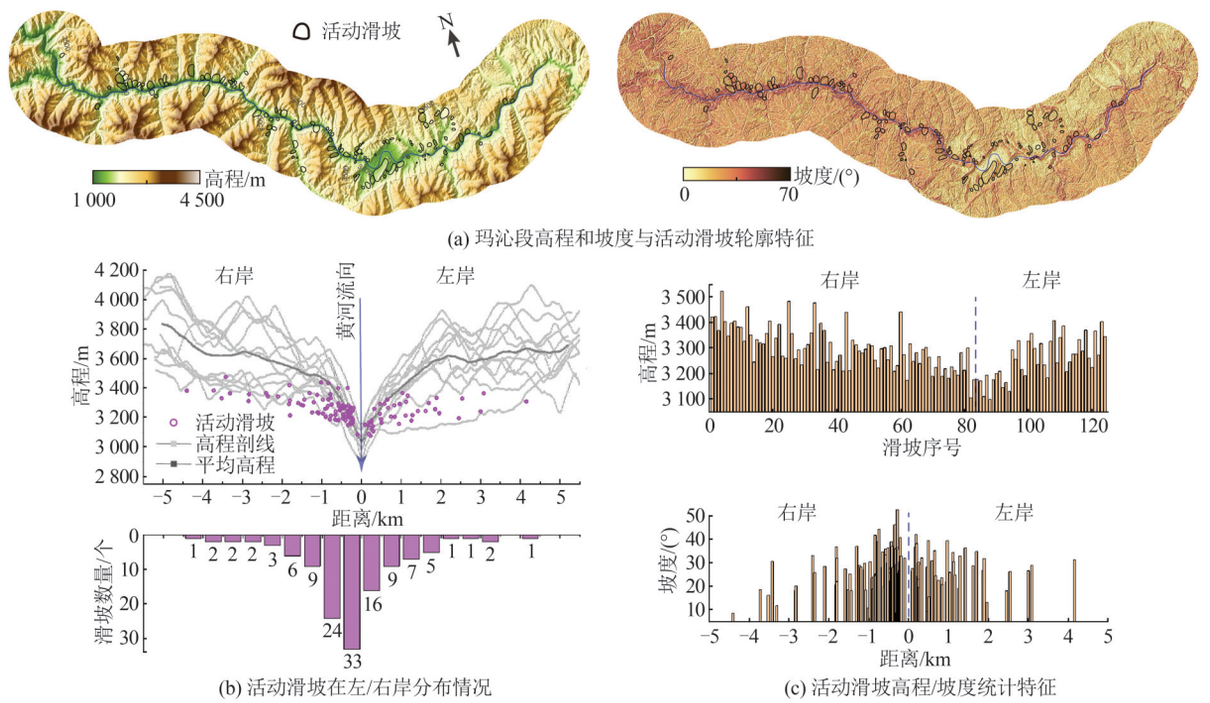
Fig. 8 ICA Decomposition Results of Deformation for the Jungong Landslide

4 讨 论

4.1 黄河上游玛沁段活动滑坡聚集性发育成因

黄河上游玛沁段的活动滑坡在空间分布上具有明显的聚集特征。图9(a)显示了叠加滑坡边界的研究区高程和坡度图,可以看出探测到的124处活动滑坡几乎都沿河谷分布,其中坡脚直接涉水的活动滑坡57个,占比达46%。为了直观地展示滑坡在黄河廊道的位置,沿垂直于黄河的11条等间隔剖线提取了两岸的高程,并叠加滑坡位置得到图9(b)。另外,按距离黄河由近到远的顺序统计了滑坡的高程和坡度见图9(c)。图9(b)表明,大部分滑坡聚集

在黄河两岸的边坡,且数量随着远离黄河快速减少。滑坡更容易出现在黄河的右岸,这与右岸具有更陡峭的坡度有关。从图9(c)可以看出,滑坡高程随着远离黄河逐渐增大,但坡度和数量则逐渐减小。这些结果表明玛沁段的活动滑坡聚集性与地貌特征密切相关,而该区域的地貌变化除了与区域的构造活动有关外,最大的环境因素则是黄河干流以及两侧沟谷长期以来的冲刷和侵蚀。研究区域为高山峡谷地貌,上下游地形落差较大,导致黄河流经该区域时河道收紧,流速加快,短时间内就能在两岸形成陡峭的临空面,加之较为软弱的泥岩地层,在这样的地形地貌条件下,很容易形成大量的滑坡体,频繁发生的局部滑塌事件一方面起到地形重塑的作用,另一方面平衡黄河下切对地貌的持续影响。



(a) 玛沁段高程和坡度与活动滑坡轮廓特征

(b) 活动滑坡在左/右岸分布情况

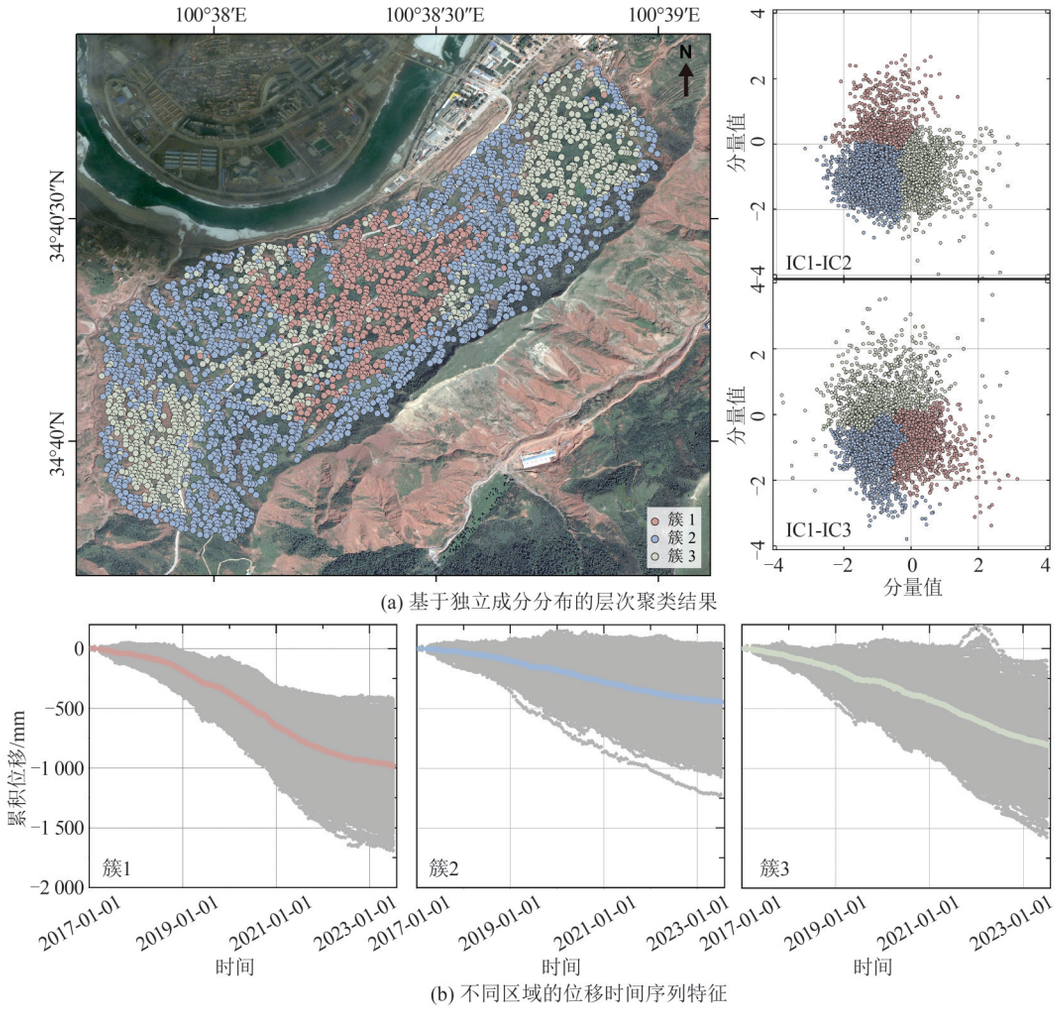
(c) 活动滑坡高程/坡度统计特征

图 9　黄河上游玛沁段活动滑坡的空间分布

Fig. 9　Spatial Distribution of Active Landslides in the Maqin Section

4.2　黄河上游军功滑坡的形变机理与分区特征

拉加镇南侧的山体边坡孕育了多处活动滑坡,其中军功滑坡的规模最大、形变也最为复杂。从图6中可以看出,在相同的地质背景下,军功滑坡的面积要比滑坡群中的其余滑坡要大得多。军功滑坡的独特性在于其地层岩性与地貌特征。拉加镇位于青藏高原的东北缘,地质背景复杂,新近系以来沉积形成的高原红层胶结较为松散,力学强度较低[3]。此外,黄河在拉加镇的连续拐弯形成了小型河谷盆地,沿岸形成了高度从数十米到数百米不等的陡坡,历史上的滑坡堆积物形成了军功老滑坡体。此后,由于滑坡体下部基岩强度低,且遇水容易膨胀和软化,导致老滑坡的滑动基底与上部堆积层不断发生整体或局部变形破坏,进而形成了多个滑动面和次级滑坡体[2-3]。复杂的机理特征表现在地表即为不均匀的地表形变,这一不均匀特征可用来对滑坡进行分区,进而评估不同区域的演化规律和风险等级。层次聚类(hierarchical clustering,HC)是一种用于分析数据集内部结构的聚类方法,该方法通过逐步合并或拆分数据对象,生成一个树状结构的层次树来展示数据的层次关系,可以通过切割树状图来确定不同数量的簇[18]。HC的优点在于不需要预先指定簇的数量,且能够生成整个数据集的层次结构,便于理解数据的内在组织方式。本文将HC应用于ICA中获得的3个独立分量,得到的聚类结果以及在平面上的映射如图10所示。根据轮廓评估法和树状图检查,共获得3个有明显的边界的簇(图10(b)),这是由于3个分量在时间上具有差异性,其中簇1位于滑坡中部区域,平均位移时序表现为先加速后趋于稳定的特征。簇3包含滑坡左侧区域和右侧的局部坡体,平均位移时序在近几年表现出了加速特征。其余区域为簇2,平均累积位移量小于其他区域,且在时间上表现为线性趋势。结合前文的分析,本文认为簇3所在的区域具有较大的滑坡风险,以簇3的左侧部分为例,该区域位于2019-09-20局部滑坡的后缘,出现的形变加速可能是由于此次



(a) 基于独立成分分布的层次聚类结果

(b) 不同区域的位移时间序列特征

图10 军功滑坡的分区特征

Fig. 10 Zoning Characteristics of Jungong Landslide

局部滑塌事件导致该区域失去了力学支撑,进而滑动速率增大。

5 结 语

本文采用InSAR技术对黄河上游玛沁段的活动滑坡进行了识别监测与稳定性分析,主要结论如下:

1)黄河上游玛沁段发育活动滑坡124处,主要集中在黄河干流两侧边坡,且右岸滑坡数量多于左岸,滑坡的聚集性发育与黄河的长期下切和侵蚀导致的局部地貌变化有关。

2)军功滑坡在近几年发生了较为严重的地表形变,且运动以水平方向为主,滑坡形变在空间上具有不均匀分布的特点,而且在时间演化上也有较大的差异性,这些特征与滑坡的地质地貌背景和形成过程有关。

3)根据军功滑坡的形变时空特征分析将滑坡分为3个活动区域和3种变形过程,结合三维形变分析认为位于滑坡左侧和右侧的局部区域具有较大的滑塌风险。

本研究中仍存在不足,一方面,需要一种定量化的分析方法来揭示黄河下切地貌对滑坡发育的影响,另一方面,由于军功滑坡具有复杂的地质背景和形变特征,本文没有对滑坡的滑动面几何参数进行研究,这对于滑坡的治理十分重要,因此,建议通过钻探等手段查明滑动面的具体分布,并对滑坡进行针对性的治理。另外,建议在滑坡形变较大区域和簇3区域安装实时监测设备,进而提升滑坡的预测预报能力。

参 考 文 献

[1] 兰恒星,彭建兵,祝艳波,等. 黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望[J]. 中国科学:地球科学,2022,52(2):199-221.
LAN Hengxing, PENG Jianbing, ZHU Yanbo, et al. Research on Geological and Surfacial Processes and Major Disaster Effects in the Yellow River Basin[J].

Scientia Sinica (*Terrae*), 2022, 52(2): 199-221.

[2] 李春阳, 贾升安, 段顺荣. 黄河深切区巨型老滑坡的稳定性评价及后续预警研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(3): 119-125.
LI Chunyang, JIA Sheng'an, DUAN Shunrong. Study on Stability Evaluation and Follow-up Early Warning of Giant Old Landslide in the Deep Cut Area of the Yellow River[J]. *Journal of Northwest Normal University* (*Natural Science*), 2023, 59(3): 119-125.

[3] 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.
CHENG Keli, BAI Huilin, FANG Hongyu. Study on Deformation and Failure Characteristics and Mechanism of Jungong Landslide in Qinghai Province [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2021, 57(1): 45-51.

[4] 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.
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.

[5] 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.

[6] CASAGLI N, INTRIERI E, TOFANI V, et al. Landslide Detection, Monitoring and Prediction with Remote-Sensing Techniques [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(1): 51-64.

[7] 朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2001-2019.
ZHU Jianjun, HU Jun, LI Zhiwei, et al. Recent Progress in Landslide Monitoring with InSAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2001-2019.

[8] 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.

[9] 张成龙, 李振洪, 余琛, 等. 利用GACOS辅助下InSAR Stacking对金沙江流域进行滑坡监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1649-1657.
ZHANG Chenglong, LI Zhenhong, YU Chen, et al. Landslide Detection of the Jinsha River Region Using GACOS Assisted InSAR Stacking [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1649-1657.

[10] LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR Datasets for Mapping Active Landslides Along the Jinsha River Corridor, China[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 106033.

[11] ZHOU C, CAO Y, HU X, et al. Enhanced Dynamic Landslide Hazard Mapping Using MT-InSAR Method in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Landslides*, 2022, 19(7): 1585-1597.

[12] 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.

[13] WRIGHT T J, PARSONS B E, LU Z. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1): 2003GL018827.

[14] SHARIFI S, MACCIOTTA R, HENDRY M, et al. Evaluating Topography-Based Methods in 3D Decomposition of InSAR 1D Velocities Obtained for Translational Landslides: Thompson River Valley in Canada[J]. *Landslides*, 2024, 21(2): 411-427.

[15] HU X, LU Z, PIERSON T C, et al. Combining InSAR and GPS to Determine Transient Movement and Thickness of a Seasonally Active Low-Gradient Translational Landslide [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(3): 1453-1462.

[16] COHEN-WAEBER J, BÜRGMANN R, CHAUSSARD E, et al. Spatiotemporal Patterns of Precipitation-Modulated Landslide Deformation from Independent Component Analysis of InSAR Time Series[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(4): 1878-1887.

[17] PENG M M, LU Z, ZHAO C Y, et al. Mapping Land Subsidence and Aquifer System Properties of the Willcox Basin, Arizona, From InSAR Observations and Independent Component Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 271: 112894.

[18] WARD J R J H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, 58(301): 236-244.