



甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测 与失稳模式研究

赵超英^{1,2} 刘晓杰¹ 张勤^{1,2} 彭建兵¹ 许强³

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 成都理工大学地质灾害与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

摘要:采用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术对甘肃黑方台地区潜在的黄土滑坡开展了多时相编目、长时序监测以及失稳模式识别研究。首先,采用不同空间分辨率、不同波长的历史存档合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据对黑方台地区 2006-12 至 2017-11 间的潜在滑坡开展了识别研究,在 2006-12 至 2011-03 和 2016-01 至 2016-11 两个时间段均识别出数 10 处不稳定坡体,实地调查和光学遥感影像验证了 InSAR 技术识别结果的可靠性与准确性。然后,对典型不稳定滑坡体采用高空间与高时间分辨率的 TerraSAR-X 数据开展了长时序监测,结果表明,在 InSAR 监测期间,累积形变最大的滑坡体在随后的时间里均发生了滑动,并成功地捕获到滑坡体形变加速的时间点。最后,利用升降轨 SAR 数据开展了黄土滑坡二维形变监测研究,基于滑坡的二维形变特征并结合地形图以及光学遥感影像进一步研究了滑坡的失稳模式,现场调查结果验证了所获得滑坡失稳模式的准确性。

关键词:黑方台;黄土滑坡;合成孔径雷达干涉测量;滑坡识别;形变监测;失稳模式

中图分类号:P237

文献标志码:A

滑坡作为一种主要的地质灾害,在世界范围内广泛分布,在中国分布更为广泛。相关研究结果表明^[1],1950—2016 年期间,发生在中国的致命性滑坡事件达到 28 139 起。然而,由于滑坡灾害的特征谱十分宽泛,受到常规滑坡调查、监测技术的限制,导致大量的灾难性滑坡时有发生,引起了中央及其防灾部门的高度重视。2018-10-10,习近平总书记在中央财经委员会第三次会议上指出:“加强地质灾害防治关系国计民生,要建立科学的自然灾害防治体系,提高全社会自然灾害防治能力,为保护人民生命财产安全和国家安全提供有力保障。”长期以来,中国在地质灾害防治方面形成了调查评价、监测预警、综合治理以及应急防治 4 大技术体系,且《“十三五”地质灾害防治规划》明确提出,计划到 2020 年要建成系统完善的 4 大地质灾害防治体系。

新型遥感对地观测技术的出现,为实现地质灾害的防治规划目标提供了重要的技术支持,其中合成孔径雷达干涉测量(interferometric syn-

thetic aperture radar, InSAR)作为一项新型的空间对地观测技术,具有全天候、全天时获取大面积地面精确形变信息的能力,近些年来已广泛应用于中国三峡库区^[2-3]、西南山区^[4-6]以及西北地区^[7-8]潜在滑坡的识别、监测以及机理研究中。

甘肃黑方台黄土台塬地处干旱少雨的西北黄土高原,20 世纪 60 年代,由于刘家峡与盐锅峡水库的修建,大量的人员移居在此。该地区年蒸发量约为年降雨量的 5.4 倍^[9],因此当地居民通过抽取大量的黄河水进行农业灌溉。长期的农业灌溉使得大量的地表水进入黄土内部,在黑方台诱发了大面积黄土湿陷以及塬边大量分布的黄土滑坡。在过去 30 余年里,发生了超过 120 次的黄土滑坡^[10]。国内外学者在此开展了多方位的研究,包括黑方台地区潜在滑坡的分布^[11]、类型及发育规律^[12]、破坏机理^[13]以及黄土滑坡的滑动模式^[14]等。

由于前期对黑方台滑坡分布调查主要采用野外地质调查、光学遥感影像、无人机摄影测量以及数字高程模型(digital elevation model, DEM)分

收稿日期:2019-02-28

项目资助:国家重点研发计划(2018YFC1504805);国家自然科学基金(41731066,41874005)。

第一作者:赵超英,博士,教授,主要从事大地测量数据处理、InSAR 及地质灾害监测研究。zhaochaoying@163.com

析等方法,大多是针对已经发生的滑坡和潜在分布滑坡的调查编目,缺乏对历史滑坡分布以及滑坡随时间变化特征的分析。在滑坡形变监测方面,缺少基于面状的滑坡形变特征以及时间演化过程的解释。在滑坡失稳模式研究方面,主要集中在野外地质调查、DEM 分析以及现场与实验室的试验来分析滑坡的失稳机理。基于此,本文采用 InSAR 技术,利用多源、多时相的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据对黑方台地区潜在的黄土滑坡开展多时相调查、长时序形变监测以及失稳模式研究。

1 基于 InSAR 技术的潜在黄土滑坡识别、监测及失稳模式研究方法

针对黄土滑坡的特殊性质,如较小的空间尺度、同一区域易多次发生以及突发性强等特点^[7],开展了基于 InSAR 技术的小尺度黄土滑坡调查、监测以及失稳模式研究,提出针对性的研究方法与数据处理流程。

1.1 InSAR 技术用于黄土滑坡多时相编目

由于 SAR 影像侧视成像的几何关系,存在阴影、叠掩以及透视收缩等几何畸变现象,易造成滑坡识别的盲区,采用单一 SAR 数据源进行滑坡识别时,容易导致滑坡漏判现象。本文采用多源、多轨道、多时相 SAR 数据开展潜在黄土滑坡的识别研究,其流程图如图 1 所示。对于任一 SAR 数据集,首先选择一个最优的主影像,所有的从影像配准到该主影像几何关系下;然后,通过设置时空基线阈值进行干涉图的生成、滤波、解缠以及轨道误差与大气误差的去除;最后选取高质量解缠干涉图,采用加权平均的方式计算卫星到地表视向的形变速率^[15]。

针对小尺度黄土滑坡的特殊性质,在 InSAR 数据处理中需要重点考虑 DEM 误差的改正、解缠误差的探测与改正以及高质量干涉图的选取。首先,本文选取短时间基线、长空间基线的干涉对来计算 DEM 误差,将计算得到的 DEM 误差迭代更新到原始 DEM 中。然后,以目视以及闭环环的方式进行解缠误差的探测,采用设置多个相干性阈值进行相位解缠以及相位补偿的方式获得解缠误差的改正。最后,对获取的形变速率通过设置形变阈值,自动化识别潜在滑坡,如果形变速率大于 2 cm/a 或者小于 -1 cm/a,将被确定为疑似滑坡。为了排除几何畸变对滑坡识别的影响,利用 DEM 梯度图以及 SAR 强度图参与验证所识

别的滑坡。

对所有的 SAR 数据集均执行上述解算步骤,并对相同时间段不同 SAR 数据集识别的结果进行交叉验证。最终对不同 SAR 数据集识别的疑似滑坡镶嵌组合生成多时相滑坡编目图。

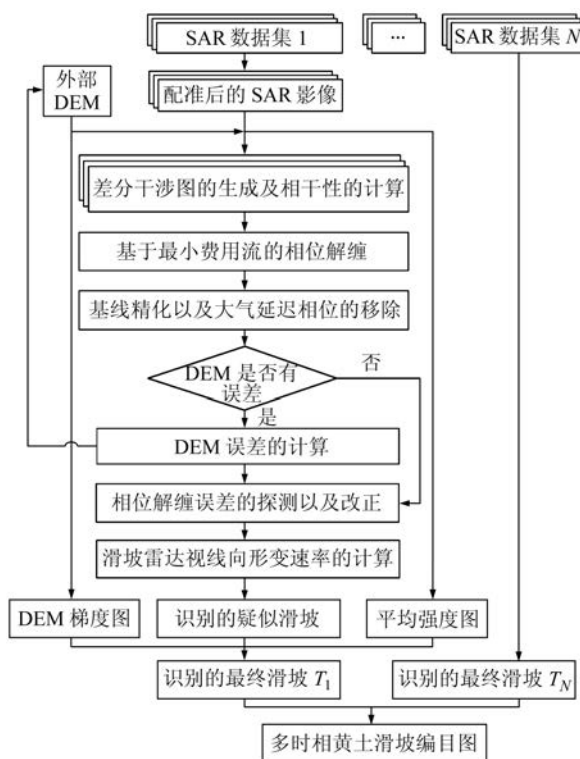


图 1 多源 SAR 数据黄土滑坡识别流程图

Fig. 1 Flowchart of Loess Landslide Detection with Multi-source SAR Datasets

1.2 InSAR 技术用于黄土滑坡长时序监测

图 2 为多源 SAR 数据集小尺度黄土滑坡长时序监测流程图。不同于黄土滑坡的识别,对每一个 SAR 数据集分别进行配准、干涉图的生成、滤波、解缠之后,采用时序 InSAR 技术^[16]计算滑坡体的时间序列形变。将不同 SAR 数据集所获得的时间序列形变结果结合起来进行滑坡体的长时序形变监测研究。

1.3 InSAR 技术用于黄土滑坡失稳模式研究

常规时序 InSAR 分析方法^[15-17]仅能够获得一维视线向形变,本文结合升降轨数据获取了滑坡体二维时序形变监测结果,通过对比垂直向与东西向的不同形变时序结果来分析不同的黄土滑坡失稳模式。针对单一雷达视线向形变的局限性, Samsonov 等^[18]提出了多维小基线集(multi-dimensional small baseline subset, MSBAS)时序 InSAR 分析方法。

如果仅获得单一 SAR 数据集,可通过式(1)计算获得时间序列形变信息^[16]。

家滑坡群(G_8)和磨石沟滑坡群(G_9)。此外,依据滑坡的破坏机理又将已知滑坡划分为黄土滑坡和黄土基岩型滑坡^[11]。2015 年之后,先后约有 16 次滑坡发生在该台塬的塬边。

2.2 试验数据

本研究总共选取了 111 景不同轨道、不同波段以及不同时间跨度的 SAR 数据,包括 34 景升轨 ALOS/PALSAR 数据(来自轨道 473 与轨道 474)、11 景升/降轨 ALOS/PALSAR-2 数据、42 景升/降轨 TerraSAR-X 数据以及 24 景降轨

Sentinel-1A/B 数据,所用 SAR 数据的详细参数如表 1 所示。

针对研究区域滑坡空间尺度小以及频发的特点,选用两种不同时间段获取的 DEM 数据消除地形相位并进行形变结果分析。对于 ALOS/PALSAR 数据集,选取 30 m 空间分辨率的 AW3D30 DSM(digital surface model),而对于 ALOS/PALSAR-2、TerraSAR-X 以及 Sentinel-1A/B 数据集,选用 2015 年生成的 3 m 空间分辨率的无人机 DEM。

表 1 SAR 数据集主要参数
Tab.1 Main Parameters of the SAR Datasets Used in this Study

卫星	波段	轨道方向	轨道号	方位向分辨率× 距离向分辨率/m ²	时间跨度	影像景数
ALOS/PALSAR	L	升轨	473	3.16×4.7	2006-12—2011-03	22
ALOS/PALSAR	L	升轨	474	3.14×4.7	2007-03—2009-10	12
ALOS/PALSAR-2	L	升轨	146	3.25×4.29	2014-11—2017-11	6
ALOS/PALSAR-2	L	降轨	39	3.25×4.29	2015-05—2017-07	5
TerraSAR-X	X	升轨	21	1.26×0.91	2016-02—2016-11	23
TerraSAR-X	X	降轨	165	1.26×0.91	2016-01—2016-11	19
Sentinel-1A/B	C	降轨	135	9.32×13.97	2016-09—2017-10	24

3 结果与分析

3.1 黑方台地区多时相滑坡识别结果

采用表 1 所示的 SAR 数据集,计算获得了黑方台地区 2006-12 至 2017-11 间的地表形变速率图,如图 4 与图 5 所示,负值表示滑坡位移沿着远离卫星的方向,正值表示滑坡位移朝着卫星的方向。图 4 为采用升轨 SAR 数据集计算获得的地表形变速率图,其中图 4(a)表示轨道 473 的 ALOS/PALSAR 数据集计算获得的 2006-12 至 2011-03 间的地表形变速率,图 4(b)表示轨道 474 的 ALOS/PALSAR 数据集计算获得的 2007-03 至 2009-10 间的地表形变速率,图 4(c)表示 TerraSAR-X 数据集计算获得的 2016-02 至 2016-11 间的地表形变速率,图 4(d)表示 ALOS/PALSAR-2 数据集计算获得的 2014-11 至 2017-11 间的地表形变速率。图 5 表示降轨 SAR 数据集计算获得的地表形变速率图,其中图 5(a)表示 TerraSAR-X 数据集计算获得的 2016-01 至 2016-11 间的地表形变速率,图 5(b)表示 ALOS/PALSAR-2 数据集计算获得的 2015-05 至 2017-07 间的地表形变速率,图 5(c)表示 Sentinel-1A/B 数据计算获得的 2016-09 至 2017-10 间的地表形变速率。从图 4 与图 5 中可以看到,不同 SAR 数据集在相同时间段内计算获得的形变区域范围具有较高的一致性。但由于不同的 SAR 数据集具

有不同的波长、空间分辨率、入射角以及卫星飞行方向等造成了局部地区形变存在较大的差异,但均能表明该区域存在潜在滑坡。

综合图 4 与图 5 可以看到,黑方台地区 2011 年之前与 2014 年之后的形变区域分布具有较大的不同。2006-12 至 2011-03 间,形变区域主要集中在方台滑坡群、野狐沟滑坡群以及磨石沟滑坡群,在党川滑坡群、黄茨滑坡群、焦家滑坡群以及陈家滑坡群的部分区域也观测到明显的形变信息。然而,在 2014 年之后,除了方台滑坡群、野狐沟滑坡群以及磨石沟滑坡群外,主要的形变区域扩展至党川滑坡群,整个党川滑坡群出现了较大形变。此外,在新塬滑坡群、焦家滑坡群以及陈家滑坡群出现了新的形变区域。尤其是新塬滑坡群,在 2006-12 至 2011-03 间,未观测到明显的形变信息,但在 2015 年之后,出现了两个新的较大形变区域。比较图 4(b)与图 4(c)可以发现,2007-03 至 2009-10 间,黄茨滑坡群存在一个明显的形变区域,但此形变区域在 2014 年之后消失,主要原因是该滑坡于 2008-05 发生了失稳滑动。

基于 § 1.1 描述的方法,2006-12 至 2011-03 间,黑方台地区共探测到 32 个潜在的滑坡区域,2016-01 至 2016-11 间共探测到 48 个潜在的活动滑坡,这些潜在的滑坡均分布在台塬的边缘,其位置如图 6 所示。从图 6(b)可以看出,2016—2017 年期间探测的滑坡尺度更小,主要是由于 SAR 数据的分辨率更高的缘故。

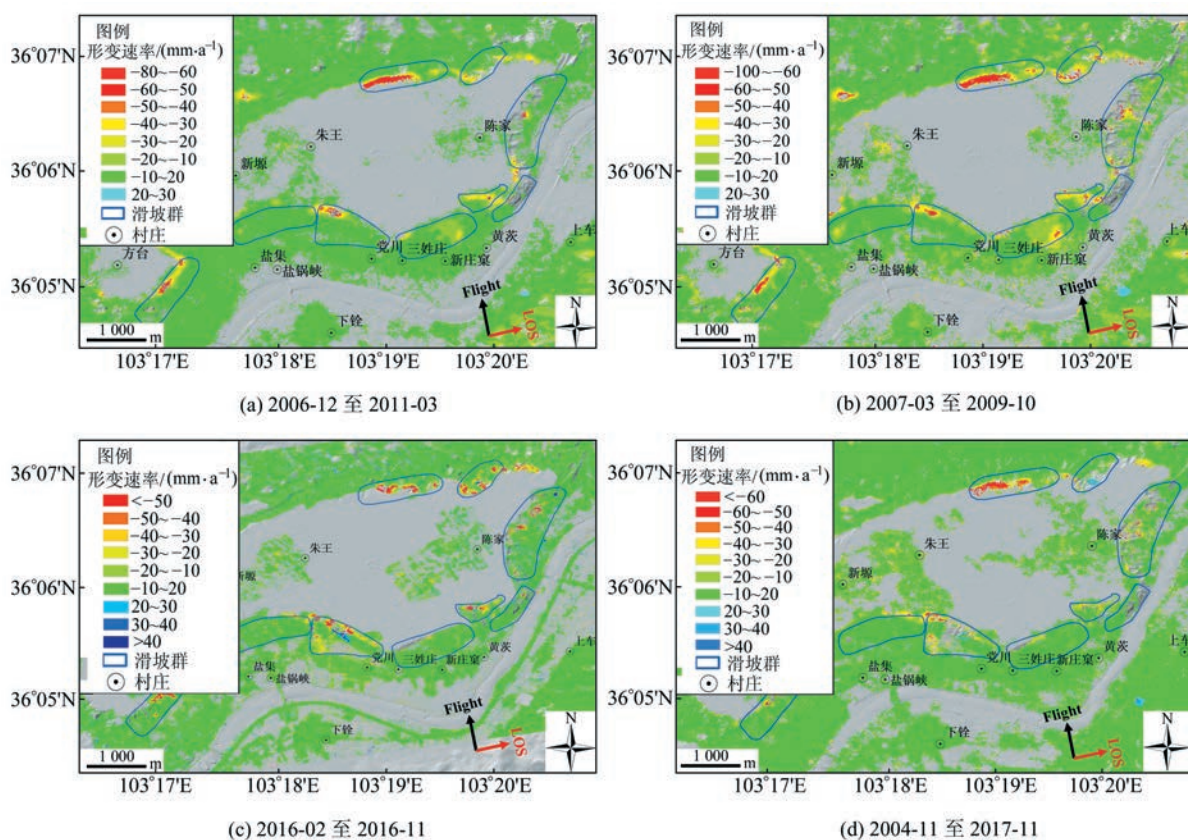


图4 升轨 SAR 数据集获得的黑方台地表形变速率图

Fig. 4 Average Deformation Rate Maps for the Heifangtai Loess Terrace Calculated with Ascending SAR Datasets

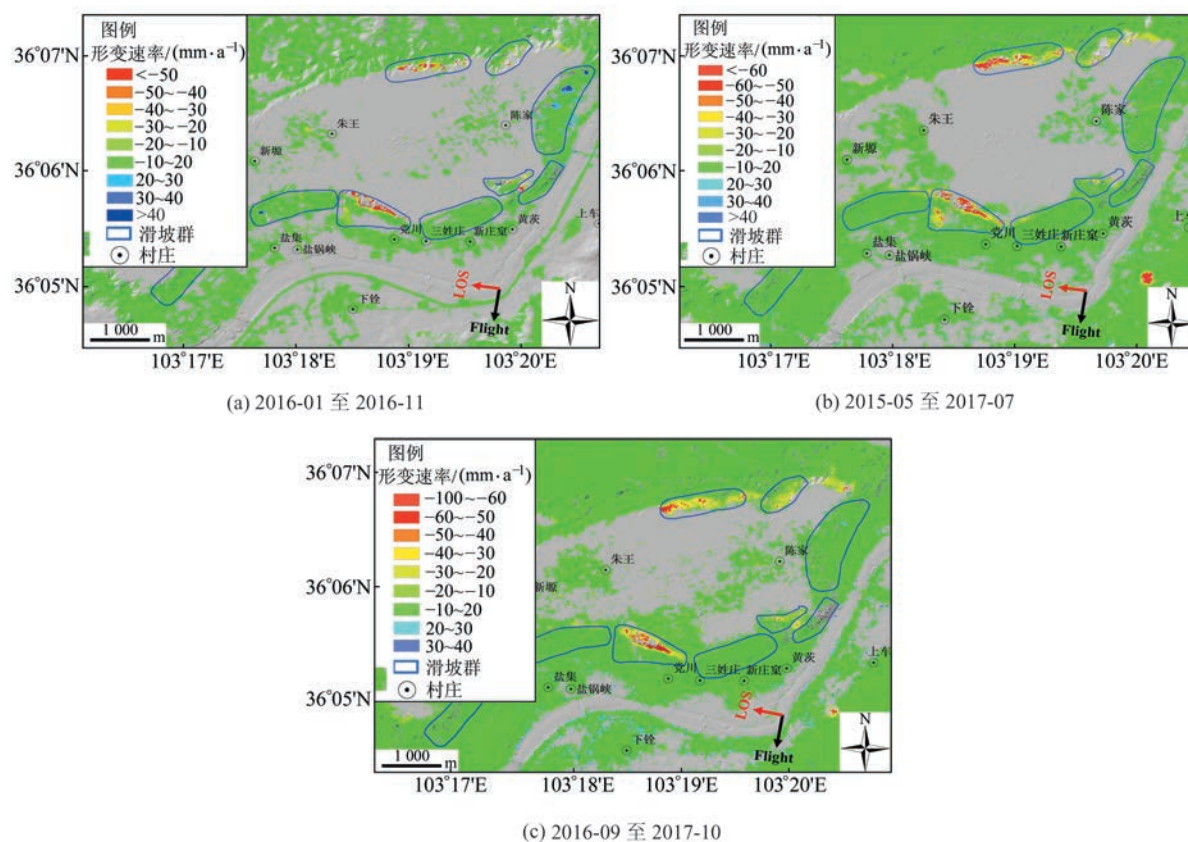


图5 降轨 SAR 数据集获得的黑方台地表形变速率图

Fig. 5 Average Deformation Rate Maps for the Heifangtai Loess Terrace Calculated with Descending SAR Datasets

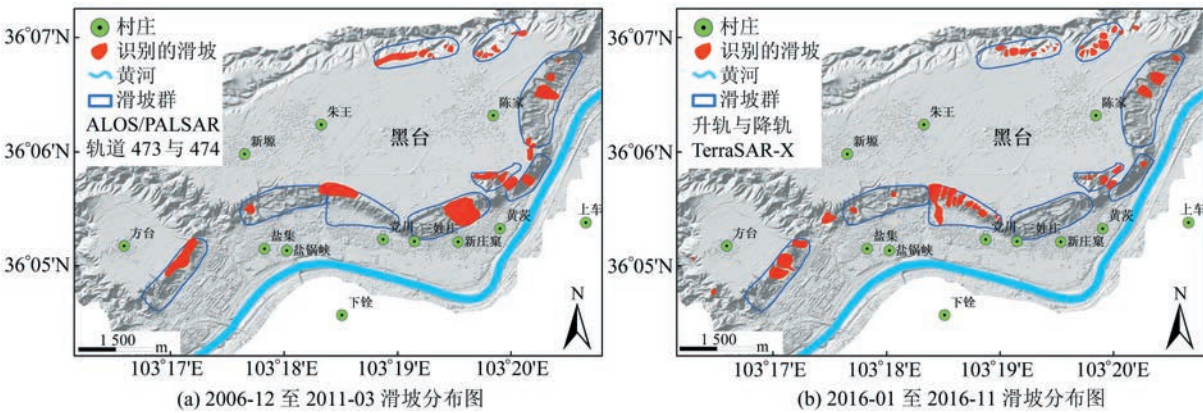


图 6 InSAR 技术识别的黑方台地区 2006-12 至 2016-11 潜在滑坡的分布图

Fig. 6 Distribution of Potential Landslides Detected by InSAR Technique from December 2006 to November 2016 in Heifangtai

3.2 黑方台地区滑坡时序形变监测结果

以党川滑坡群为例,采用 3 种覆盖不同时间段的 SAR 数据集进行滑坡形变的长时序监测研究,即 ALOS/PALSAR 数据集(2006-12 至 2011-03)用于研究滑坡体的历史形变特征,TerraSAR-X 数据集(2016-01 至 2016-11)用于滑坡体的实时连续监测,Sentinel-1A/B 数据集(2016-09 至 2017-10)用于捕获滑坡体的形变加速过程。图 7 为党川滑坡群的遥感影像以及 2006-12 至 2017-10 间的地表形变速率图,其中图 7(a)为 2017-11 获取的该滑坡群遥感影像,图 7(b)为 ALOS/PALSAR 数据集计算获得的该滑坡群 2006-12

至 2011-03 间的地表形变速率,图 7(c)为 TerraSAR-X 数据集计算获得的该滑坡群 2016-01 至 2016-11 间的地表形变速率,图 7(d)为 Sentinel-1A/B 数据集计算获得的该滑坡群 2016-09 至 2017-10 间的地表形变速率。从图 7 中可以看到,2006-12 至 2011-03,党川滑坡群的形变主要集中在党川 2 号(DC 2#)与党川 3 号(DC 3#)滑坡,其分别发生于 2015-04-29 与 2015-08-03,其他区域未观测到明显的形变信息,而 2016-01 至 2017-10 期间,整个党川滑坡群存在明显的大形变。

图 8 与图 9 分别为党川 2 号、3 号、4 号以及 5 号滑坡 2006-12 至 2011-03 与 2016-01 至 2016-

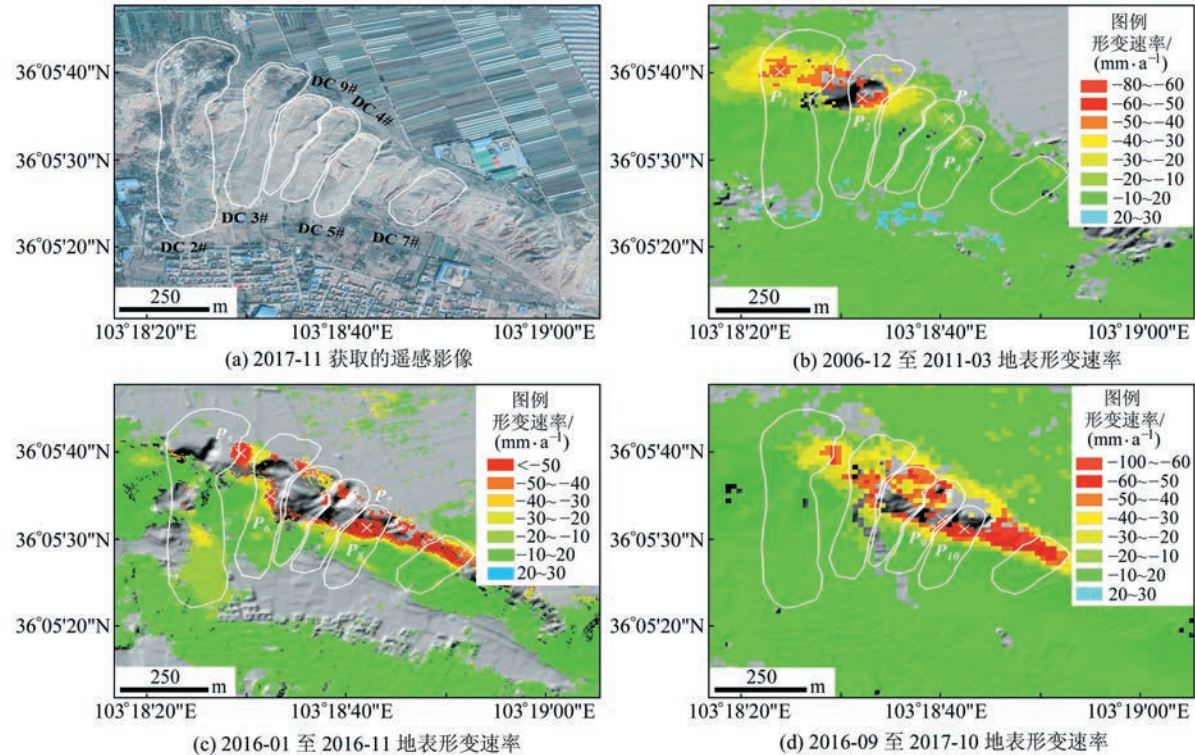


图 7 党川滑坡群遥感影像以及地表形变速率图

Fig. 7 Remote Sensing Image and Deformation Rate Maps of Dangchuan Landslide Group

11 间的形变时序结果。从图 8 中可以看到, 2006-12 至 2011-03, 党川 2 号与 3 号滑坡持续变形, 在 4 a 多的时间里, 累积形变在雷达视线方向上分别达到了 -210 mm 与 -300 mm。此外, 2010-07-10 之后, 党川 3 号滑坡的形变出现明显的加速。对于党川 4 号与 5 号滑坡, 其在 2007-10-30 之前是基本稳定的, 随后开始出现形变。从图 9 中可以看到, 2016-01 至 2016-11, 党川 2 号、3 号、4 号以及 5 号滑坡在不到 1 a 的时间里, 其累积形变在雷达视线方向上分别达到了 -114 mm、 -82 mm、 -217 mm 以及 -129 mm。党川 4 号与 5 号滑坡在 2017-10-01 同时发生了失稳, 这两个滑坡也是 2016-01 至 2016-11 间累计形变最大的两个区域。Sentinel-1A/B 数据成功捕获到党川 4 号与 5 号滑坡发生前的形变加速时间点, 如图 10 所示。从图 10 中可以看到, 党川 4 号滑坡在 2017-09-16 开始出现形变加速, 而党川 5

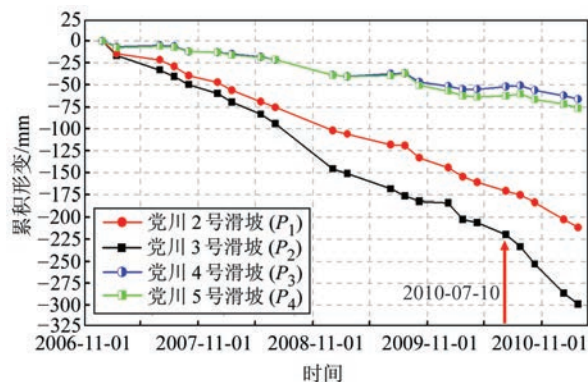


图 8 党川 2 号、3 号、4 号以及 5 号滑坡 2006-12 至 2011-03 间的时间序列形变

Fig. 8 Time Series Deformation of Dangchuan No. 2, No. 3, No. 4 and No. 5 Landslides from December 2006 to March 2011

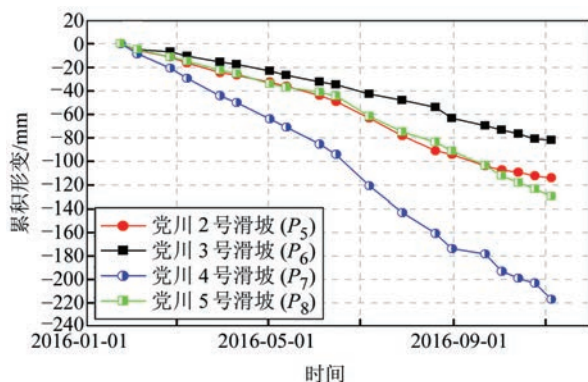


图 9 党川 2 号、3 号、4 号以及 5 号滑坡 2016-01 至 2016-11 间的时间序列形变

Fig. 9 Time Series Deformation of Dangchuan No. 2, No. 3, No. 4 and No. 5 Landslides from January 2016 to November 2016

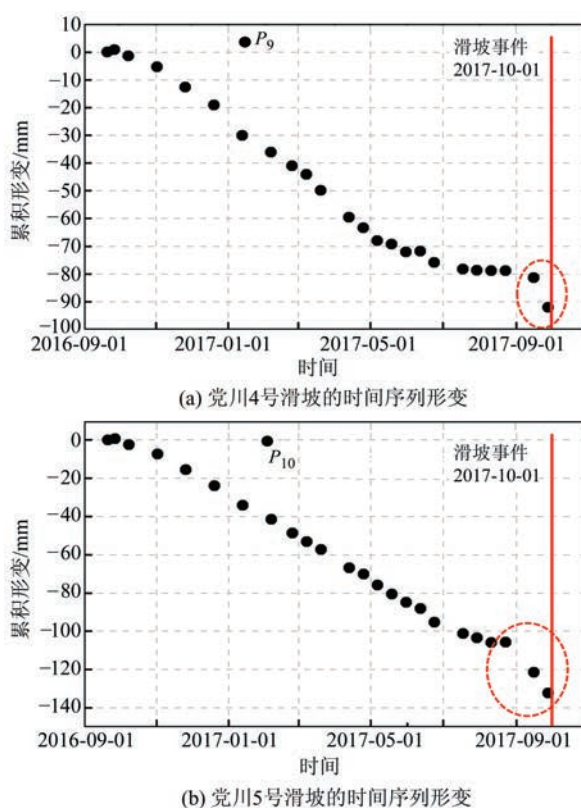


图 10 党川 4 号与 5 号滑坡 2016-09 至 2017-10 间的时间序列形变

Fig. 10 Time Series Deformation of Dangchuan No. 4 and No. 5 Landslides from September 2016 to October 2017

号滑坡在 2017-08-23 开始出现形变加速, 此结果与现场裂缝计监测结果高度一致。

3.3 典型滑坡体失稳模式分析

以新源 2 号滑坡为例, 研究其形变特征及失稳模式。选用覆盖研究区域 2016-01 至 2016-11 的升/降轨 TerraSAR-X 数据集, 计算获得该滑坡体二维形变速率及时间序列形变结果。图 11 为



图 11 新源 2 号滑坡遥感影像

Fig. 11 Remote Sensing Image of Xinyuan No. 2 Landslide

2017-11-12 获取的该滑坡遥感影像,图 11 中的黄色箭头表示该滑坡的主要滑动方向,基于形变特征将其划分为 4 个区,即 I、II、III 和 IV 区。图 12 为该滑坡的地形图。图 13 为该滑坡 2016-01 至 2016-11 间的地表形变速率图,其中图 13(a)为升轨 TerraSAR-X 数据集计算得到的雷达视线向形变速率,图 13(b)为降轨 TerraSAR 数据集计算得到的雷达视线向形变速率,图 13(c)为垂直向形变速率,向下运动为负值,图 13(d)为水平东西向形变速率,向东运动为正值。从图 13 中可以看到,升/降轨数据因不同的观测几何而探测到的形变区域以及形变量级均不同。二维形变图显示该滑坡整体向东运动,且垂直向形变仅出现在滑坡体的边缘。I 区同时具有垂直向与东西向形变,但垂直向形变大于东西向形变;II 区仅有东西向形变;III 区同时具有垂直向形变与东西向形变,但东西向形变大于垂直向形变;IV 区仅有垂直向形变。在 4 个区域中各选取 1 个特征点($P_{11} \sim P_{14}$)来研究该滑坡体的二维形变演化特征,如图 14 所示。可以看到,该滑坡体在 2016-01 至 2016-11 期间,每个部分在垂直向和东西向都有持续的变形。垂直向最大的累积形变出现在 I 区,不到 1 a 的时间里,其累积形变达到 -33 mm ;

东西向最大的累积形变出现在 II 区,不到 1 a 的时间里,其累积形变达到 54 mm 。此外,2016-10, P_{12} 点与 P_{13} 点在东西向的形变出现加速的趋势, P_{13} 点与 P_{14} 点在垂直向的形变出现加速的趋势,推测此现象可能是由于受到地下水水位上升的影响。

综合二维形变特征、遥感影像、地形信息以及早前学者关于黄土滑坡失稳模式的研究^[21],可以推断新塬 2 号滑坡的二维形变特征与黄土滑坡的渐进后退式失稳模式高度一致,说明该滑坡为渐进后退式失稳滑坡。其机理为地下水的上升造成了黄土层被软化,在自身重力作用下,滑坡体表面

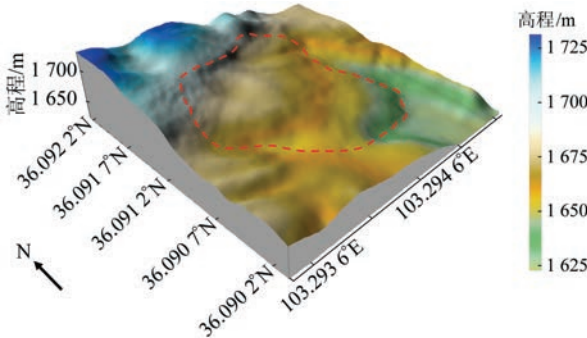


图 12 新塬 2 号滑坡地形图
Fig. 12 Topographic Map of Xinyuan No. 2 Landslide

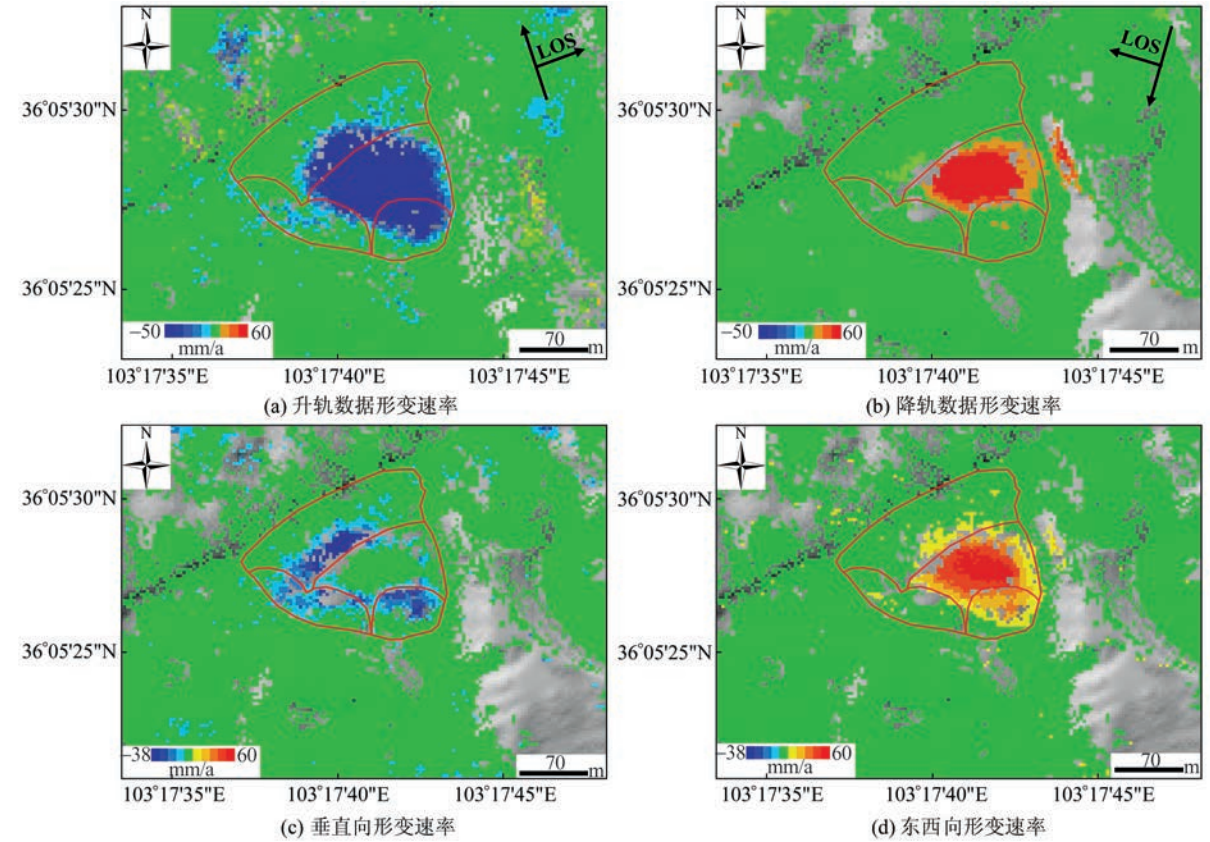
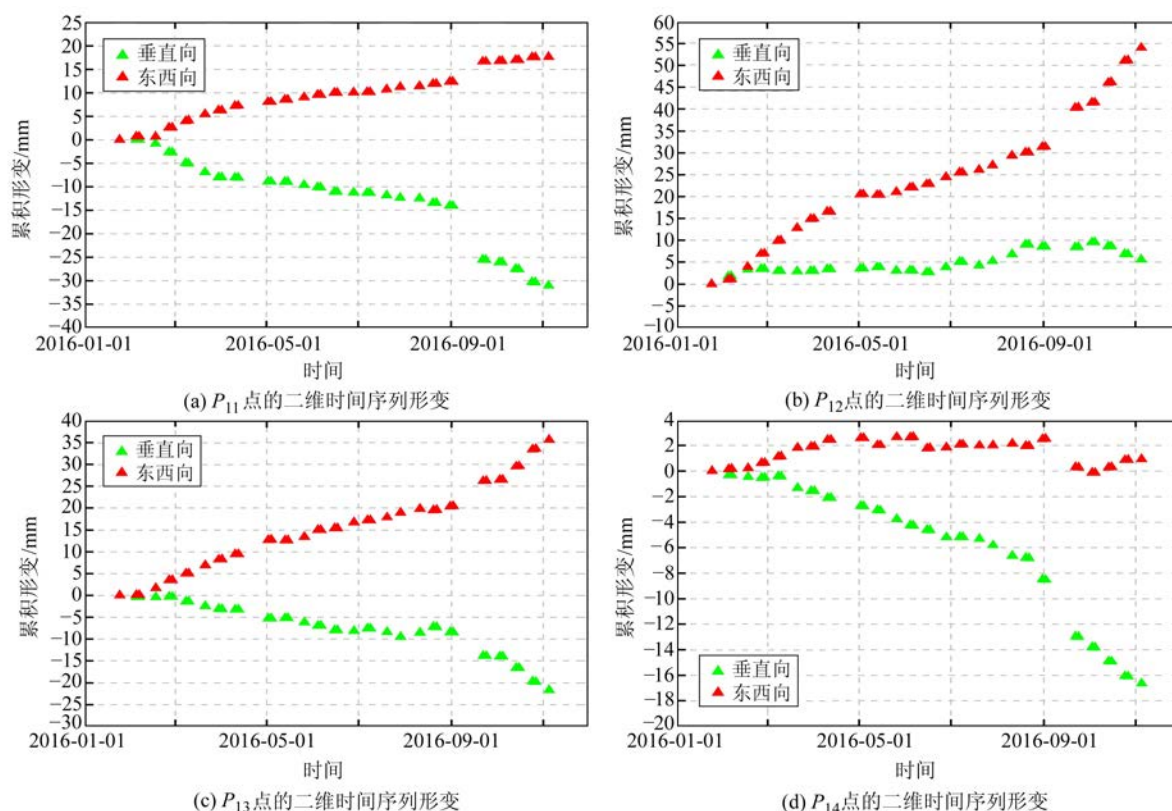


图 13 新塬 2 号滑坡二维形变速率图
Fig. 13 Two-Dimensional Deformation Rate Maps of Xinyuan No. 2 Landslide

图 14 新塬 2 号滑坡 $P_{11} \sim P_{14}$ 点的二维时间序列形变Fig. 14 Two-Dimensional Time Series Deformation of Xinyuan No. 2 Landslide for Point $P_{11} \sim P_{14}$

产生拉张裂缝;随着时间的推移,张裂缝持续向下延伸;当整个张裂缝贯通时,滑坡发生失稳。该滑坡发生后,形成新的局部临空面,滑坡后缘的应力持续发生改变,形成新的拉张裂缝,产生第 2 次、第 3 次滑坡,如此反复,在同一滑坡体形成渐进后退式失稳。

4 结果验证及讨论

4.1 InSAR 滑坡识别结果验证

为了验证 InSAR 技术识别潜在滑坡的准确性与可靠性,于 2018-08 对 InSAR 所识别的滑坡进行了现场调查验证,图 15 为 InSAR 识别的部分典型滑坡体的现场照片。结果表明,InSAR 所识别的潜在滑坡实际均具有滑坡空间特征。对于重点滑坡区域,如党川滑坡群、焦家滑坡群、陈家滑坡群以及磨石沟滑坡群,在滑坡体上均观测到密集的裂缝分布以及后缘明显的张拉裂缝,最大的裂缝宽度达到 60 cm,裂缝间的错台达到 140 cm。通过实地调查,验证了本文 InSAR 技术所识别滑坡的可靠性与准确性。

4.2 新塬 2 号滑坡形变机理及失稳模式验证

图 16 为新塬 2 号滑坡现场照片,可以看到

InSAR 技术获得的该滑坡二维形变特征及失稳模式与实际地形及特征高度一致。密集裂缝切割整个滑坡体,形成破碎的表面,在滑坡体的后缘出现了明显的拉裂缝,裂缝间的错台达到数米,滑坡体的左侧分布着数个因雨水冲刷形成的地洞。此外,在 I 区和 III 区均观测到明显的地表沉陷。

5 结 语

本文以甘肃黑方台黄土台塬为试验区,首次采用 InSAR 技术对该地区潜在的黄土滑坡开展了多时相编目、形变监测以及失稳模式研究。主要结论有:①2006-12 至 2011-03 间共探测到 32 个潜在的滑坡区域,2016-01 至 2016-11 间共探测到 48 个潜在的滑坡体,野外调查验证了 InSAR 技术识别的黄土滑坡具有较高的可靠性。②典型滑坡形变的长时序监测结果表明,累计形变最大的滑坡在随后发生失稳的可能性高,采用 InSAR 技术可以捕捉到滑坡形变加速的时间点,这为滑坡预警提供了可能性。③通过滑坡二维形变监测,有效克服了单一 InSAR 雷达视线向形变无法深入分析滑坡形变机理的局限性,可用于黄土滑坡的失稳模式研究。

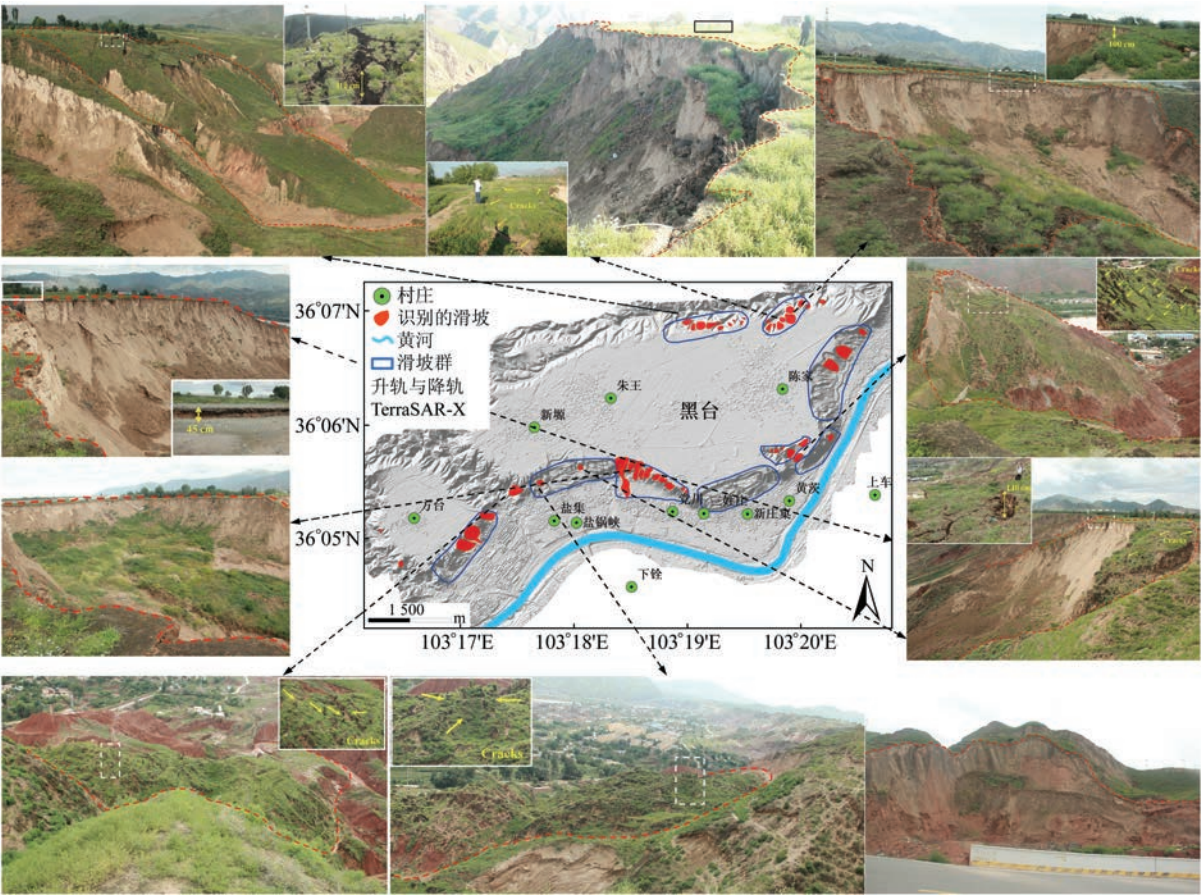


图 15 InSAR 识别的典型滑坡体现场照片

Fig. 15 Scene Photos of Typical Landslides Identified by InSAR Technique

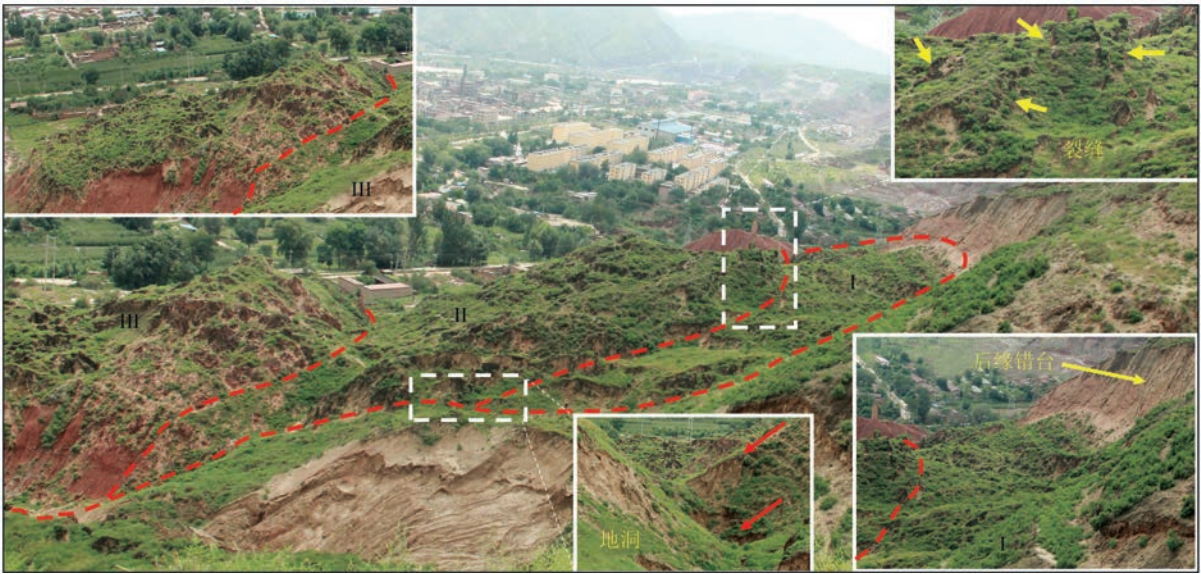


图 16 新塬 2 号滑坡现场照片

Fig. 16 Scene Photos of Xinyuan No. 2 Landslide

参 考 文 献

- [1] Lin Q, Wang Y. Spatial and Temporal Analysis of a Fatal Landslide Inventory in China from 1950 to 2016 [J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2 357-2 372
- [2] Shi X, Liao M, Li M, et al. Wide-Area Landslide Deformation Mapping with Multi-path ALOS PAL-SAR Data Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2):136
- [3] Sun L, Muller J P, Chen J. Time Series Analysis of

- Very Slow Landslides in the Three Gorges Region Through Small Baseline SAR Offset Tracking [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1 314
- [4] Ao Meng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. An Improved CR-InSAR Technology Used for Deformation Monitoring in Jiaju Landslide, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 377-383(敖萌, 张勤, 赵超英, 等. 改正的 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡变形监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(3): 377-383)
- [5] 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): 2 039-2 049(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): 2 039-2 049)
- [6] Zhao C, Kang Y, Zhang Q, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 993
- [7] Zhao C, Zhang Q, He Y, et al. Small-Scale Loess Landslide Monitoring with Small Baseline Subsets Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique—Case Study of Xinyuan Landslide, Shaanxi, China [J]. *J Appl Remote Sens*, 2016, 10(2): 1-14
- [8] Li M, Zhang L, Shi X, et al. Monitoring Active Motion of the Guobu Landslide Near the Laxiwa Hydropower Station in China by Time-Series Point-Like Targets Offset Tracking [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 80-93
- [9] Zeng R, Meng X, Zhang F, et al. Characterizing Hydrological Processes on Loess Slopes Using Electrical Resistivity Tomography—A Case Study of the Heifangtai Terrace, Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 742-753
- [10] Cui S, Pei X, Wu H, et al. Centrifuge Model Test of an Irrigation-Induced Loess Landslide in the Heifangtai Loess Platform, Northwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(1): 130-143
- [11] Peng D, Xu Q, Liu F, et al. Distribution and Failure Modes of the Landslides in Heitai Terrace, China [J]. *Engineering Geology*, 2017, 236: 97-110
- [12] Xu L, Dai F, Tu X, et al. Landslides in a Loess Platform, North-West China [J]. *Landslides*, 2014, 11(6): 993-1 005
- [13] Xu L, Dai F, Gong Q, et al. Irrigation-Induced Loess Flow Failure in Heifangtai Platform, North-West [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(6): 1 707-1 713
- [14] Xu L, Qiao X, Wu C, et al. Causes of Landslide Recurrence in a Loess Platform with Respect to Hydrological Processes [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1 657-1 670
- [15] Lyons S, Sandwell D. Fault Creep Along the Southern San Andreas from Interferometric Synthetic Aperture Radar, Permanent Scatterers, and Stacking [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2003, 108(B1): 2 047
- [16] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40(11): 2 375-2 383
- [17] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39(1): 8-20
- [18] Samsonov S, d'Oreye N, Smets B. Ground Deformation Associated with Post-mining Activity at the French-German Border Revealed by Novel InSAR Time Series Method [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23(1): 142-154
- [19] Samsonov S, Feng W, Peltier A, et al. Multidimensional Small Baseline Subset(MSBAS) for Volcano Monitoring in Two Dimensions: Opportunities and Challenges. Case Study Piton de la Fournaise Volcano [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017, 344: 121-138
- [20] Xu Q, Li H, He Y, et al. Comparison of Data-Driven Models of Loess Landslide Runout Distance Estimation [J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2017, 8: 1-14
- [21] Qi X, Xu Q, Liu F. Analysis of Retrogressive Loess Flowslides in Heifangtai, China [J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 119-128

Research on Loess Landslide Identification, Monitoring and Failure Mode with InSAR Technique in Heifangtai, Gansu

ZHAO Chaoying^{1,2} LIU Xiaojie¹ ZHANG Qin^{1,2} PENG Jianbing¹ XU Qiang³

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

3 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique is used over Heifangtai loess terrace, Gansu province of China to map the distribution of potential loess landslides, the evolution of landslide deformation and the failure mode. Firstly, the archived synthetic aperture radar (SAR) datasets with different spatial resolutions and wavelengths from December 2006 to November 2017 are used to identify the potential landslides. Tens potential landslide areas are identified from December 2006 to March 2011 and from January 2016 to November 2016. Field investigation and optical remote sensing images validate the reliability and accuracy of the identified landslides. Then, the TerraSAR-X data with high spatial and temporal resolution are used to monitor the time series deformation of the typical unstable slopes. Results demonstrate that the landslides with the large accumulative deformation all occur in the following time, and the acceleration dates of failed landslides are successfully captured by InSAR time series results. Finally, two-dimensional deformation monitoring of loess landslide is conducted by combining with ascending and descending SAR datasets. The landslide failure mode are analyzed in depth according to the obtained two-dimensional deformation results, topographic map and remote sensing images. The accuracy of the obtained result is verified by field investigation.

Key words: Heifangtai; loess landslide; interferometric synthetic aperture radar(InSAR); landslide identification; deformation monitoring; failure mode

First author: ZHAO Chaoying, PhD, professor, specializes in geodetic data processing, SAR interferometry and geohazards monitoring. E-mail: zhaochaoying@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFC1504805; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41731066, 41874005.