

中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡 SBAS-InSAR 早期识别及发育特征分析

苏晓军^{1,3,4}, 张毅^{2,3}, 孟兴民^{2,3,4}, Rehman Mohib Ur^{1,3,4},
Khalid Zainab^{1,3,4}, 赵富萌^{1,3,4}, 岳东霞^{1,3,4}, 郭富赞⁵, 周自强⁶

1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000;
2. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000;
3. 甘肃省环境地质与灾害防治技术创新中心, 兰州 730000;
4. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
5. 甘肃省地质环境监测院, 兰州 730050;
6. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000

摘要: 中巴经济走廊巴基斯坦境内洪扎河谷 (Hunza Valley) 段地形高差巨大、地质环境复杂, 滑坡灾害多发, 对河谷内村镇威胁极大, 也严重制约中巴经济走廊安全建设与运行。为了加深对 Hunza 河谷滑坡灾害的认识, 亟待进行滑坡识别编目和发育特征研究。本研究基于升、降轨获取的 87 景哨兵一号 (Sentinel-1) 数据, 利用 SBAS-InSAR 技术获取了洪扎河谷地表形变, 计算了地表斜坡向形变速率。并综合利用光学遥感影像解译和野外实地调查验证, 成功识别了洪扎河谷 53 处潜在滑坡, 并讨论了滑坡识别效果, 对 Ghulmet 和 Humarri 两个典型大型滑坡监测形变、影像解译和验证特征进行了分析。在此基础上, 选取 11 个地形地质环境因素作为影响滑坡发育的因子, 分析了滑坡分布发育特征。结果表明, 升轨和降轨数据监测到研究区内斜坡向最大形变速率分别为 -311 mm/a 和 -490 mm/a, 洪扎河谷区不稳定形变阈值为 -20 mm/a。大型滑坡受河流侵蚀作用, 形变剧烈, 次级滑坡发育。识别的潜在滑坡主要集中在河流两岸、公路上下边坡; 潜在滑坡主要分布在风化堆积层以及千枚岩、板岩等变质岩区; 高差 200—1000 m、坡度 30°—40°和坡向南、南西向为滑坡发育的优势地形条件; 斜坡地表裸露、植被稀疏地段 (NDVI<0.2) 物源充足, 滑坡较为发育。研究结果可用于巴基斯坦洪扎河谷防灾减灾工作, 保障中巴经济走廊畅通运营, 为具有毁路与堵江风险的滑坡重点监测和评价研究提供科学参考和数据支持。

关键词: 中巴经济走廊, 洪扎河谷, 滑坡, SBAS-InSAR, 地表形变, 早期识别, 发育特征

中图分类号: P237/P2

引用格式: 苏晓军, 张毅, 孟兴民, Rehman Mohib Ur, Khalid Zainab, 赵富萌, 岳东霞, 郭富赞, 周自强. 2024. 中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡 SBAS-InSAR 早期识别及发育特征分析. 遥感学报, 28(4): 885–899

Su X J, Zhang Y, Meng X M, Rehman M U, Khalid Z, Zhao F M, Yue D X, Guo F Y and Zhou Z Q. 2024. Potential landslides identification and development characteristics analysis in Hunza valley, along China-Pakistan Economic Corridor based on SBAS-InSAR. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 885–899 [DOI: 10.11834/jrs.20221536]

1 引言

滑坡是世界范围内最常见、分布最为广泛的地质灾害之一, 每年造成难以估量的基础设施和财产损失以及大量人员伤亡 (Froude 和 Petley, 2018; Haque 等, 2016; Intrieri 等, 2019)。全面

早期识别潜在滑坡是防灾减灾工作的重要前提, 滑坡识别及编目也是滑坡易发性制图和风险区划研究的重要基础 (Guzzetti 等, 2000), 滑坡位置、分布以及发育模式等信息对于预测受灾区域和量化灾害风险及损失至关重要。而在有些地区, 由于所掌握的滑坡数据信息不甚全面, 导致许多灾

收稿日期: 2021-08-05; 预印本: 2022-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2017YFC1501005); 甘肃省科技计划(编号: 18YF1WA114); 甘肃省科技重大专项(编号: 19ZD2FA002); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(编号: lzujbky-2021-ey05)

第一作者简介: 苏晓军, 研究方向为环境遥感、地质灾害识别、监测与评价。E-mail: suxj17@lzu.edu.cn

通信作者简介: 张毅, 研究方向为环境遥感与地质灾害。E-mail: zhangyigeo@lzu.edu.cn

难事件的发生 (Kamp 等, 2010; Meusburger 和 Alewell, 2009), 滑坡识别与编目工作中存在的不足仍然是限制滑坡灾害评估可靠性的主要原因之一 (Ardizzone 等, 2002)。

中巴经济走廊北起中国新疆维吾尔自治区喀什市 (以下简称“新疆喀什”), 经过红其拉甫口岸进入巴基斯坦, 再向西南经洪扎河谷穿越喀喇昆仑山脉、兴都库什山脉、喜马拉雅山脉, 南抵巴基斯坦港口城市瓜达尔港。其北部段以新疆喀什至巴基斯坦塔克特市的中巴喀喇昆仑公路为主要通道 (图1), 区内构造复杂, 气候多变, 不良地质环境作用下, 滑坡、泥石流灾害多发 (Qing 等, 2020; Zhao 等, 2019; 赵富萌 等, 2020; Su 等, 2021), 尤其在巴基斯坦北部段, 显著的气候变化、强烈的构造活动及多年的人类工程活动成为促进和诱发滑坡灾害的主要原因, 引起广泛关注 (Ali 等, 2017; Shafique 等, 2016)。洪扎河谷段最为典型, 人口密度大, 滑坡灾害问题突出, 造成了严重的灾害和损失 (Ahmed 等, 2016; Bacha 等, 2018; Rehman 等, 2020; Shafique 等, 2016), 潜在滑坡隐患严重威胁着城市、村镇的发展和人身财产安全 (Rehman 等, 2020), 也严重威胁中巴经济走廊的建设和安全运行 (Rehman 等, 2020)。

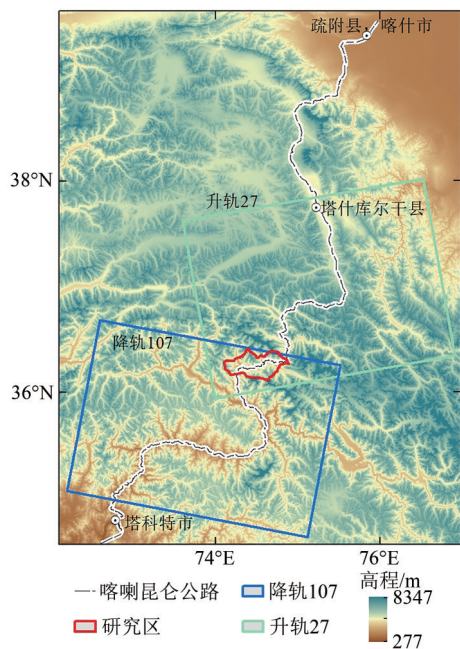


图1 研究区位置及哨兵一号数据覆盖位置图

Fig. 1 The location of study area and the coverage of the Sentinel-1A datasets

有学者曾对中巴经济走廊内的滑坡、冰川、泥石流及碎屑流等灾害进行了调查和研究 (Ahmed

和 Rogers, 2014; Yang 等, 2016, 2011)。也有研究在喜马拉雅山区、洪扎河谷基于卫星影像进行滑坡识别编目与评价 (Ahmed 等, 2016; Bacha 等, 2018; Martha 等, 2013)。

Hussain 等 (2021) 利用高分辨率遥感影像解译和多元统计等方法对中巴经济走廊巴基斯坦北段的滑坡易发性进行了评价, 获得了较为全面的历史滑坡数据, 但存在所用数据年代较早、数据来源单一等问题 (Ali 等, 2019; Yang 等, 2011)。这些研究引起了对中巴经济走廊及中巴公路沿线滑坡灾害防治的关注, 但是仅限于已有滑坡的编目和评价, 对于考虑现今地表形变监测的潜在滑坡研究则稍显不足。然而, 在现今气候变化、人类活动综合作用越发显著的情况下, 滑坡灾害越来越多发。传统的地质灾害调查与测绘手段成本较高, 尤其在可及度较低的高原山区, 难以提升工作效率; 单一遥感解译手段受影像分辨率、天气状况、甚至重访周期等的限制, 已经无法满足地质灾害防治研究的现势需求 (Kang 等, 2021; Liu 等, 2021; 苏晓军 等, 2021; 赵富萌 等, 2020)。现有研究成果也难以满足中巴经济走廊建设和当地地质灾害防灾减灾的需求, 亟需采用先进方法开展潜在滑坡识别与发育特征研究。开展基于 InSAR 监测的潜在滑坡识别研究, 有助于及时发现滑坡隐患、尽早制定应急预案, 对于支撑中巴经济走廊建设和当地防灾工作具有十分重要的意义。

SBAS-InSAR 技术已被广泛应用于山区地质灾害的识别 (Kang 等, 2017; Zhang 等, 2019; Rehman 等, 2020; 李晓恩 等, 2021; 廖明生 等, 2021)。监测结果指示灾害风险源的分布和位置 (张亚迪 等, 2019)。尽管已有少量应用 InSAR 技术监测识别中巴公路沿线滑坡的研究, 但在洪扎区域, 潜在滑坡升降轨 SAR 数据综合识别及发育特征分析方面的专门案例研究较为匮乏。在中巴公路沿线, 以单轨道数据为主完成了潜在滑坡的识别和发育分析 (Su 等, 2021)。Rehman 等 (2020) 曾利用 InSAR 技术对典型滑坡灾害进行识别分析, Zhao 等 (2019) 利用 InSAR 监测形变结果来提升滑坡易发性评价结果, 但都只应用了单一轨道获取的 SAR 数据进行监测, 由于受到观测几何的限制, 无法较全面地监测区域内形变位置, 滑坡识别和易发性评价有待进一步提升。

基于以上灾害严重特征和研究现状及必要性,

以中巴经济走廊洪扎河谷为研究区，进行多源遥感监测识别，一方面，监测获得地表形变速率，结合地形地貌特征、光学影像特征开展调查验证，识别洪扎河谷滑坡隐患。另一方面，根据监测识别的滑坡数据，进一步综合地形地貌、地质构造、水文植被等内外因子分析其分布发育特征。研究可为后续开展滑坡易发性评价制图、洪扎河谷区及中巴经济走廊沿线防灾减灾技术研究提供方法参考和数据支撑。

2 研究区概况

洪扎河谷位于巴基斯坦北部，是中巴经济走廊内地质环境最为复杂、地形高差最为巨大的区段，总面积 1127.76 km²。地貌类型属于喀喇昆仑侵蚀构造高山区，区内海拔最低 1663 m，最高 7395 m，相对高差 5000 m 以上。狭窄的河谷两侧分布羽状冰川、泥石流沟谷，侵蚀强烈，部分地段发育河流阶地（图 2）。

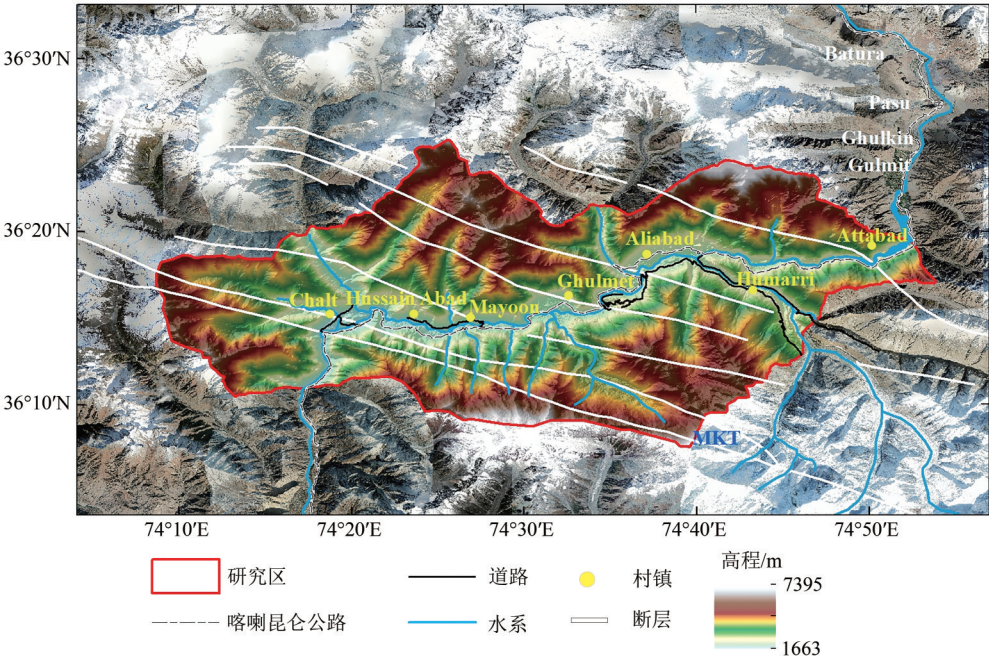


图2 研究区概况图

Fig. 2 Overview of the study area

区内活动构造发育。由于印度板块和亚欧板块激烈碰撞，洪扎地区形成北西—南东走向主喀喇昆仑断裂 MKT（Main Karakoram Thrust），逆冲走滑强烈（Rehman 等，2020），伴有分支断层活动，因此沟壑交错纵横，岩体破碎（Verma 和 Sekhar，1986），斜坡岩土体强度减弱。节理裂隙的发育为降水入渗和地下水活动提供了良好的通道，也促进放大了河流侵蚀对斜坡稳定性的影响。

Batura, Pasu, Ghulkin, 以及 Gulmit 等为主的冰川侵蚀和消融过程为滑坡的发育发生提供了充足的物质和水动力来源（Derbyshire 等，2001）。随着夏季高山积雪融化补给，洪扎河水流量激增，侵蚀增强，常诱发滑坡灾害（Ahmed 等，2016），严重威胁着公路及通行人员车辆和当地人民的生命财产（Ali 等，2017；Rehman 等，2020），也影响着该区域的环境和生态安全（Searle 等，1999）。

区内滑坡发育与山区人类活动、经济走廊建设也密切相关。

3 数据与方法

本研究数据处理与分析主要包括 4 个步骤：数据准备、变形速率监测和初步解译、潜在滑坡现场调查与编目、滑坡发育特征分析，SAR 数据处理和滑坡识别综合技术流程如图 3 所示。

3.1 研究数据

本研究所用数据主要包括：自 2019 年 1 月 2 日至 2020 年 6 月 13 日以及自 2019 年 1 月 8 日至 2020 年 6 月 19 日的升轨（27）和降轨（107）哨兵 1 号（Sentinel-1A）微波遥感数据，升轨数据 45 景，降轨数据 42 景，共计 87 景（图 1，表 1）。C 波段成像的 Sentinel-1A 干涉宽幅单视复数 SLC（Single Look Complex）数据几何分辨率为 5 m×20 m。美

国航空航天局（NASA）的 SRTM（Shuttle Radar Topography Mission）DEM 数据（30 m 分辨率）用于去平地效应和地形相位、地理编码。光学影像来源于 Google Earth 平台。

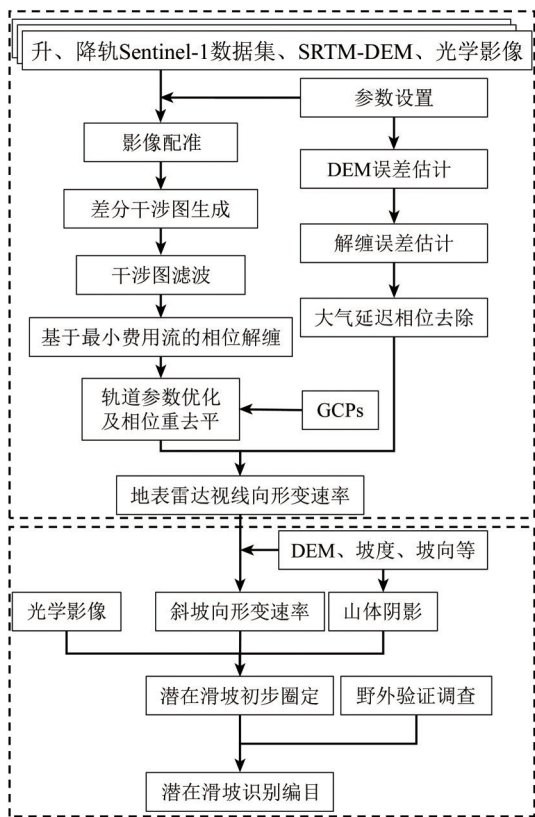


图3 基于SBAS-InSAR技术潜在滑坡识别流程图
Fig. 3 Workflow for landslide detection based on SBAS-InSAR processing

滑坡发育特征研究用到的高差、坡度、坡向等地形地貌因子由SRTM DEM数据计算得到。归一化植被指数NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）用以表示研究区内植被覆盖及长势，由2019年6月的Landsat 8 OLI数据反演计算得到。断层、岩性分布等地质背景数据参考Searle等（1999）以及Fraser等（2001）的研究结合野外调查获得，根据区内岩性软弱程度，划分为5组（Su等，2021）。并参考前人有关滑坡与地震关系研究的经验（Bontemps等，2020；Keefer，2002），从美国地质调查局获取了2000年以来里氏震级4.0以上的震中数据（<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes> [2021-08-05]）。根据以上数据计算了距断层、震中、道路的距离以研究地质环境及人类活动对滑坡分布和发育的影响。

表1 SAR影像及具体参数

Table 1 Basic parameters of SAR datasets	
属性	参数
卫星	Sentinel-1A
波段	C
波长/cm	5.6
入射角/(°)	37.05
方位角/(°)	83.94(升轨) -83.94(降轨)
轨道/(Path)	升轨(27) 降轨(107)
帧/(Frame)	117(升轨) 473(降轨)
方位向及距离向分辨率/(m×m)	20×5
最短时间基线/d	12
影像数量/景	45(升轨) 42(降轨)
时间范围	2019-01-02—2020-06-13(升轨) 2019-01-08—2020-06-19(降轨)
多视参数(方位向×距离向)	1×4

3.2 研究方法

3.2.1 SBAS-InSAR原理

SBAS-InSAR（Small Baseline Subset-InSAR）方法为了减小卫星视角差异造成的误差和失相干，设定一定的空间基线与时间基线阈值连接SAR影像，建立若干小基线集合。像对在小基线集内干涉生成干涉图之后，基于相干性筛选高相干点，进行相位解缠，利用最小二乘法和奇异值分解估计形变相位及误差，然后通过空间域低通滤波和时间域高通滤波分离并去除大气相位延迟，最终得到形变结果（Berardino等，2002；Hooper，2008；Lanari等，2004；Schmidt和Bürgmann，2003）。SBAS-InSAR方法的突出特点是综合考虑时间、空间基线的相关性来选取多幅主影像，以增强相干性，得到更多高相干点。

3.2.2 SBAS-InSAR处理参数与流程

SBAS-InSAR技术关键处理包含：单视复数影像配准、单视复数影像预滤波、干涉图生成、相位解缠、轨道参数优化与重去平地效应、滤波去除大气相位、地理编码等步骤，在ENVI SARscape软件平台上实现SAR数据的处理。首先，设置距

离向和方位向多视因子为4和1，并对升、降轨数据集设置时间和空间基线分别为70 d和210 m、70 d和200 m，以完成所有影像重采样并生成小基线集；在生成干涉图后，以相干阈值为0.35设置高斯（Goldstein）滤波器（Gabriel等，1989；Goldstein和Werner，1998）进行滤波处理，以提高信噪比和干涉对相干性。再利用最小费用流（MCF）算法（Berardino等，2003；Costantini，1998）进行相位解缠。进一步通过精炼、重去平和反演估算残余高程相位和形变信息，通过时空域滤波去除大气相位（Zhao等，2016）。由于SBAS技术处理中组合了多个子集，因此使用奇异值分解（SVD）来估计每个监测日期的形变信息（Berardino等，2003；Hooper，2008）。最后以0.4为相干性阈值反演获得研究区的雷达视线向地表年平均形变速率（图3）。

3.2.3 潜在滑坡解译识别

综合应用升、降轨SAR数据监测地表形变速率、光学遥感解译、野外实地调查进行潜在滑坡识别。滑坡变形多数表现为沿着斜坡方向发生崩塌、搬运和堆积，而SBAS-InSAR方法监测获得的是沿雷达视线方向的年平均地表形变速率 V_{LOS} （Velocity along the line of sight），无法真实反映斜坡变形和滑坡发育特征，为了更直观解译地表形变并准确识别滑坡隐患，本文基于前人（Kang等，2017；Schlögell等，2015）经验将 V_{LOS} 转换为沿斜坡向形变速率（ V_{slope} ），具体原理如下：

$$V_{slope} = \frac{V_{LOS}}{Index} \quad (1)$$

式中参数如下：

$$Index = n_{LOS} \cdot n_{slope} \quad (2)$$

式中，

$$n_{LOS} = (-\sin \theta \cos \alpha, \sin \theta \sin \alpha, \cos \theta) \quad (3)$$

$$n_{slope} = (-\sin \beta \cos \varphi, -\cos \beta \cos \varphi, \sin \varphi) \quad (4)$$

$$n_{LOS} \cdot n_{slope} = (\sin \theta \cos \alpha)(\sin \beta \cos \varphi) - (\sin \theta \sin \alpha)(\cos \beta \cos \varphi) + (\cos \theta \sin \varphi) \quad (5)$$

式中， α 是雷达方位角， θ 是雷达入射角， β 是斜坡的坡向， φ 为坡度。

InSAR监测获得的结果为滑坡识别的基本前提数据，体现的是地表斜坡的形变。将斜坡向形变结果与光学遥感影像、DEM以及山体阴影等反应地物及地形特征的图层要素进行叠加分析，可根据不同地物在光学影像中不同的纹理、色彩、亮

度等特征、数字高程和山体阴影中地形地貌特征等判断滑坡发育迹象，比如拉张陡坎与裂缝、剪切侧界裂缝、堆积平台、前缘隆起等特征，从而初步确定潜在的滑坡区域；并以此为基础，通过现场地质调查与验证，可以对潜在滑坡的边界加以核对修改，同时对地表形变速率值进行再次分类渲染，最终达到的效果是将潜在滑坡区域与监测得到高形变速率位置对应匹配，同时实现确认研究区内识别潜在滑坡的形变速率阈值的目的（图3）。

4 研究结果与分析

4.1 SBAS-InSAR技术监测地表形变结果与分析

应用SBAS-InSAR技术进行监测，最终以0.4为相干性阈值反演得到雷达视线向形变速率值，升轨数据监测得到形变速率值为-115—23 mm/a（图4），降轨数据监测得到形变速率值为-190—53 mm/a（图5）。由于滑坡的发育为斜坡受各种因素影响而沿着一定深度滑动面或破裂面产生的斜坡失稳滑动，为了更有效地利用InSAR监测形变准确识别潜在滑坡，根据前文提到的方法，基于ArcGIS计算工具利用SRTM DEM和Sentinel-1A观测几何参数计算，处理得到斜坡向形变速率，由升轨和降轨数据监测得到斜坡向最大形变速率分别为-311 mm/a（图6）和-490 mm/a（图7）。因为升降轨不同的观测几何条件对应着不同的雷达可视性，导致升降轨不同数据集监测获得的地表形变结果覆盖并非完全一致，因此，两个数据结果显示区内最大形变速率略有差别。根据前述思路，通过数据解译和调查验证，将-20 mm/a的斜坡向形变速率设置为洪扎河谷识别潜在滑坡的阈值。统计发现，在升轨数据监测获得的118315个相干点中，有117677个（占99.4%）位于（-20，20）的视线向变形速率区间内（图4）；有109687个（占92.7%）位于（0，-20）的斜坡向变形速率区间内（图6）。降轨数据监测获得139699个相干点，其中133290个点（占95.4%）形变速率位于（-20，20）的视线向变形速率区间内（图5）；109153个点斜坡向形变速率位于（0，-20）区间，占78.13%（图7）。统计表明总体上多数区域都是相对稳定的，同时也印证了SBAS-InSAR技术适合监测高原山地等起伏较大的不平坦地表形变信息，并监测识别不稳定形变区域（Rehman等，2020）。

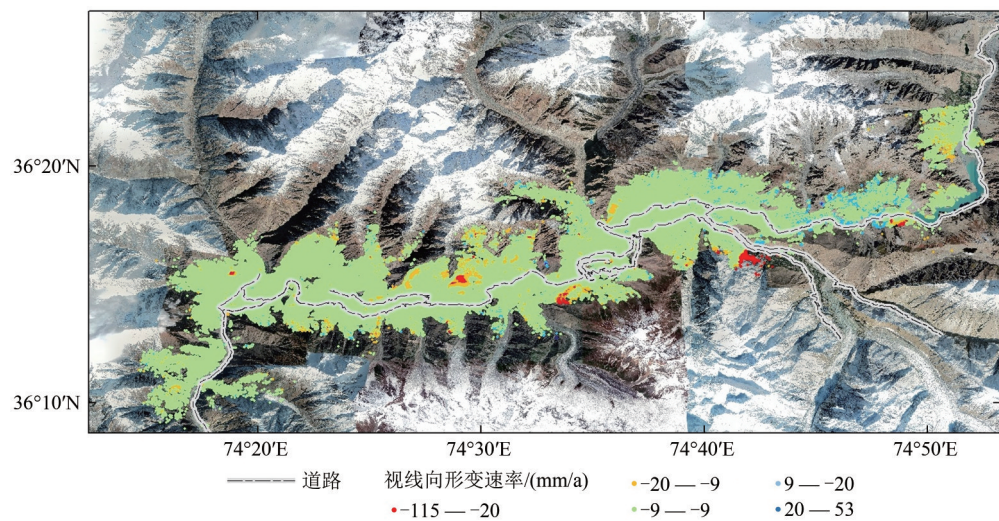


图4 SBAS-InSAR应用升轨 Sentinel-1A 数据监测视线向形变速率

Fig. 4 The deformation velocity along the line of the satellite detected by SBAS-InSAR applying the ascending Sentinel-1A datasets

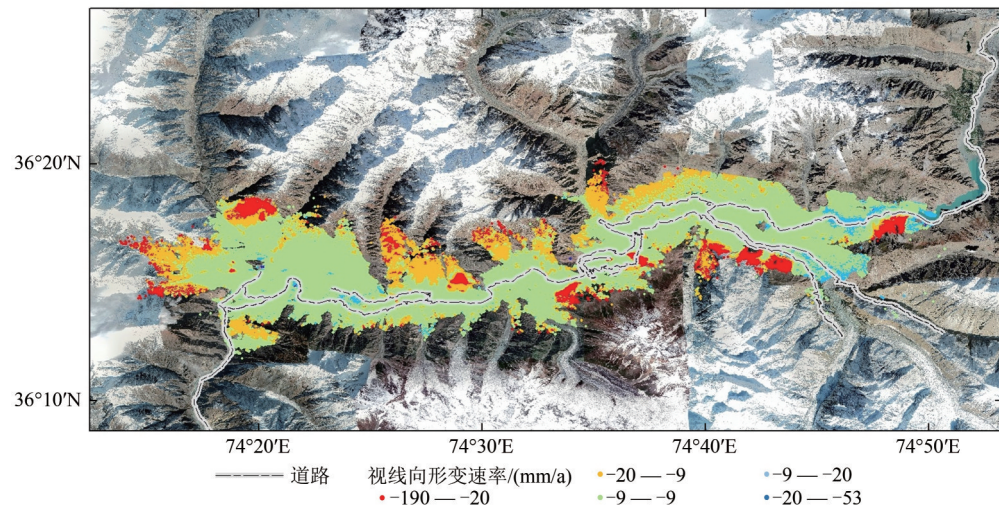


图5 SBAS-InSAR应用降轨 Sentinel-1A 数据监测视线向形变速率

Fig. 5 The deformation velocity along the line of the satellite detected by SBAS-InSAR applying the descending Sentinel-1A datasets

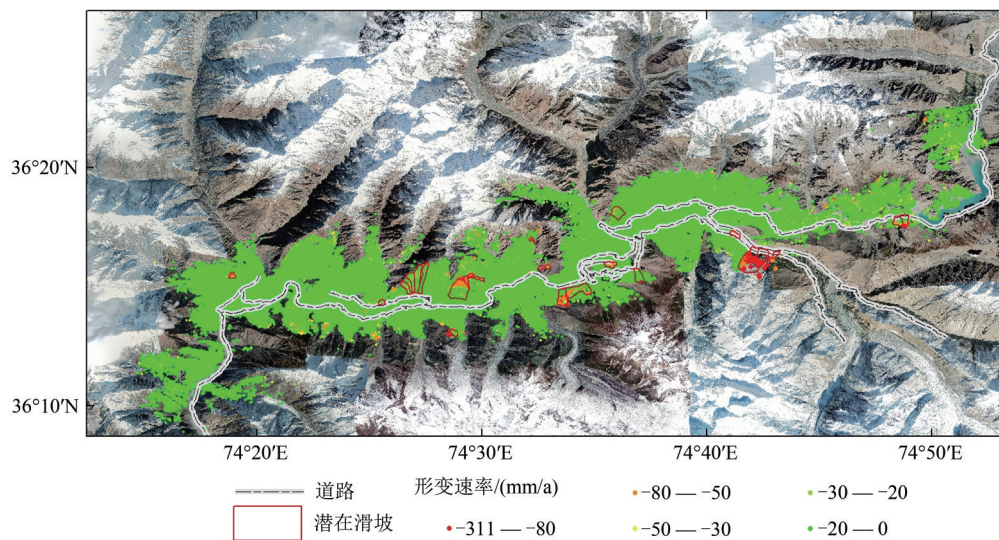


图6 SBAS-InSAR应用升轨(27),第117帧 Sentinel-1A 数据监测地表斜坡向形变速率和识别的滑坡

Fig. 6 The deformation velocity along the slope and landslides detected by SBAS-InSAR applying the ascending Sentinel-1A dataset from Path 27, Frame 117

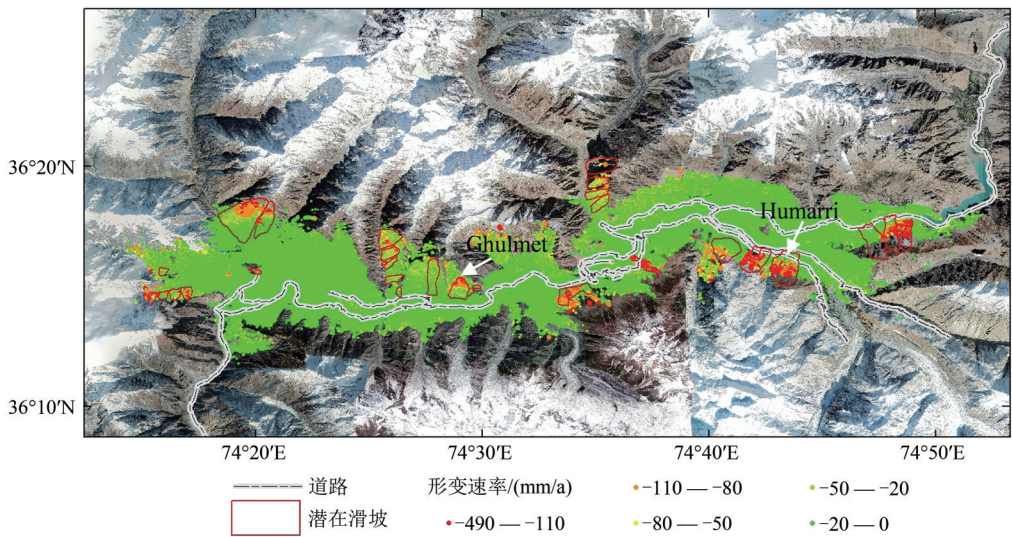


图7 SBAS-InSAR应用降轨(107),第473帧Sentinel-1A数据监测地表斜坡向形变速率和识别的滑坡
Fig. 7 The deformation velocity along the slope and landslides detected by SBAS-InSAR applying the descending Sentinel-1A dataset from path 107, frame 473

4.2 基于SBAS-InSAR的滑坡识别与分析

结合升降轨哨兵数据监测的地表形变速率，进行光学遥感影像解译和野外实地调查验证工作(图2)。形变结果与遥感影像特征、地形特征较为吻合的斜坡可以进行初步圈定。在野外现场调查验证中，根据初步圈定结果，对现场斜坡变形位置、变形区域、潜在滑坡的变形裂缝、陡坎、边界等特征进行验证，核对一致的斜坡被编目为潜在滑坡(图2)。最终，完成了研究区内滑坡的监测识别，共识别出53处潜在滑坡(图7)。调查发现，在洪扎河谷，滑坡的主要特征有陡峭后壁、裂缝、陡坎发育和破碎的岩土体，以及滑坡体上较低甚至无植被覆盖，野外验证与影像解译均具备相符的滑坡发育特征。与已有研究(Bacha等，2018; Rehman等，2020)对比分析发现，升轨和降轨数据的综合应用可以克服因观测几何有限带来的漏测缺点，所获的更大范围形变覆盖保证了识别效果，最终监测调查识别的滑坡数量有所提升，与该区滑坡实际发育程度较为吻合。

为了进一步定量评价识别精度，从而讨论本研究所用方法的有效性，以前人Bacha等(2018)光学遥感解译的滑坡为对比数据，进行了逐一判别(图8)。对比发现，本文应用InSAR识别的滑坡，其中有29处曾在Bacha等(2018)的研究中以光学影像解译得到识别。因研究区边界不完全一致，进一步对比了洪扎河谷Hussain Abad至Hassan Abad滑坡集中段约300 km²区域内的滑坡灾

害，本研究识别了该区域33个滑坡，其中24个滑坡为先前识别过的滑坡(图7)。可见，由于特殊的地质环境因素，区内大部分滑坡长期处于变形状态，成为主要灾害隐患；一些斜坡体由于侵蚀、人类活动等因素开始变形并逐步发育；不同的研究因观测时间和尺度不一，所获得的滑坡数据不完全一致，也各有针对性。而本研究利用InSAR的监测优势，根据长时间形变监测和调查较全面地判识了潜在滑坡。

4.3 典型滑坡形变识别特征

以Ghulmet滑坡和Humarri滑坡(图7)为例分析滑坡的InSAR监测形变、影像解译和验证特征。两个滑坡在先前研究中也报道过(Rehman等，2020)。由快速形变点及其外界的低速率稳定点所界定的形变范围(图9(a)，图10(a))与验证的破坏形变证据一致(图9(c)，图10(b)(d))。

Ghulmet村滑坡，位于Hunza河右岸，倾向南，滑坡长1500 m，平均宽1300 m(图9)。InSAR监测到其上部形变速度大于-20 mm/a(图9(a))，前缘部分也处于变形状态。滑坡形成后壁，因陡峭地形、重力作用下发生崩塌、碎屑流。而滑坡前缘由于受河流侵蚀而产生次级崩塌。影像中的色彩、纹理特征，可辅助InSAR监测结果的解译与潜在滑坡的圈定(图9(b))。在野外实地调查中可观察到圈椅状后壁和裂缝等典型特征(图9(c))，与遥感监测解译结果相符。

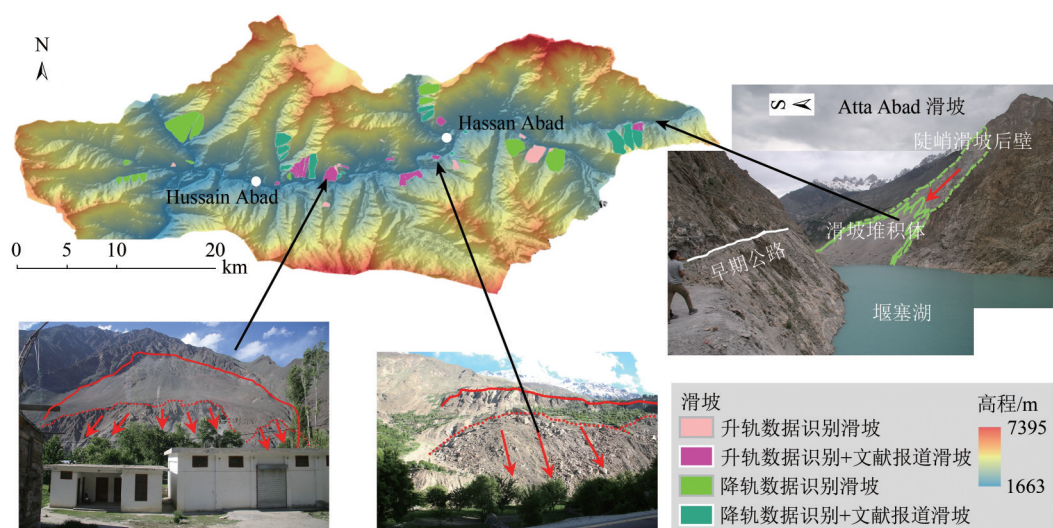
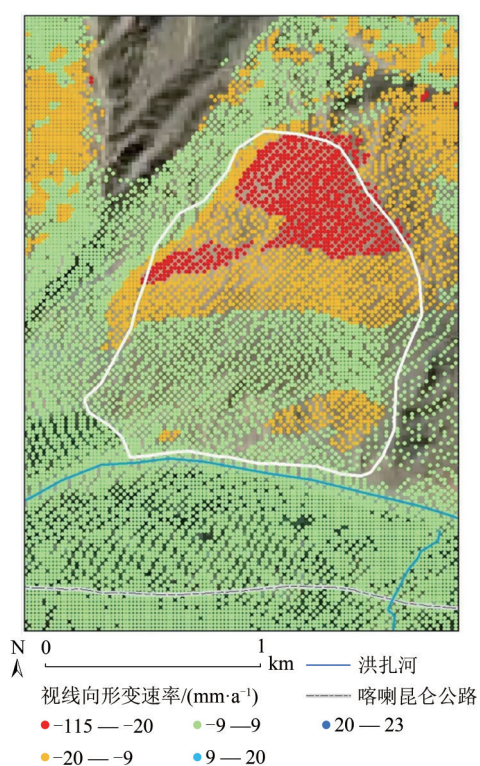


图8 研究区滑坡分布及验证照片

Fig. 8 The landslides inventory distribution and verification photos taken in sites



(a) InSAR 监测 Ghulmet 滑坡形变速率

(a) Deformation rate on the Ghulmet landslide detected by InSAR



(b) 遥感影像特征

(b) Features interpreted from optical remote sensing image



(c) 野外实地验证滑坡特征

(c) The features of landslide observed in the field validation

图9 Ghulmet 滑坡监测形变速率、遥感影像解译特征及实地验证特征

Fig. 9 Enlarged deformation rate map, features interpreted from optical remote sensing image and photos from field validation of Ghulmet landslide

Humarri 村西南, 主喀喇昆仑断层穿过, Humarri 滑坡后壁的发育受其控制。滑坡位于 Hispar 河左岸, 由冰川、河流相沉积物组成, 主要岩性为深变质岩 (图 10)。滑坡整体变形量较大, 坡体形变监测结果覆盖较为全面, 雷达视线向平均形变

速率 -34 mm/a , 斜坡向形变速率高达 -72 mm/a , 滑坡东侧界形变点聚集 (图 10 (a))。影像解译滑坡后缘拉张裂缝发育明显, 野外验证发现滑坡侧界发育陡坎、裂缝, 坡体由于推挤、剪切变形而造成树木歪斜 (图 10 (b) (c))。该滑坡下部

物质破碎松散，受河水侵蚀而发育次级滑坡。松散堆积坡体局部由于形变速率过快，而产生失相干，较难完全监测到该次级滑坡整个坡体形变信

息，而坡脚产生的崩滑形变被 SBAS-InSAR 监测捕捉到，与调查验证相符（图 10（a）（d））。

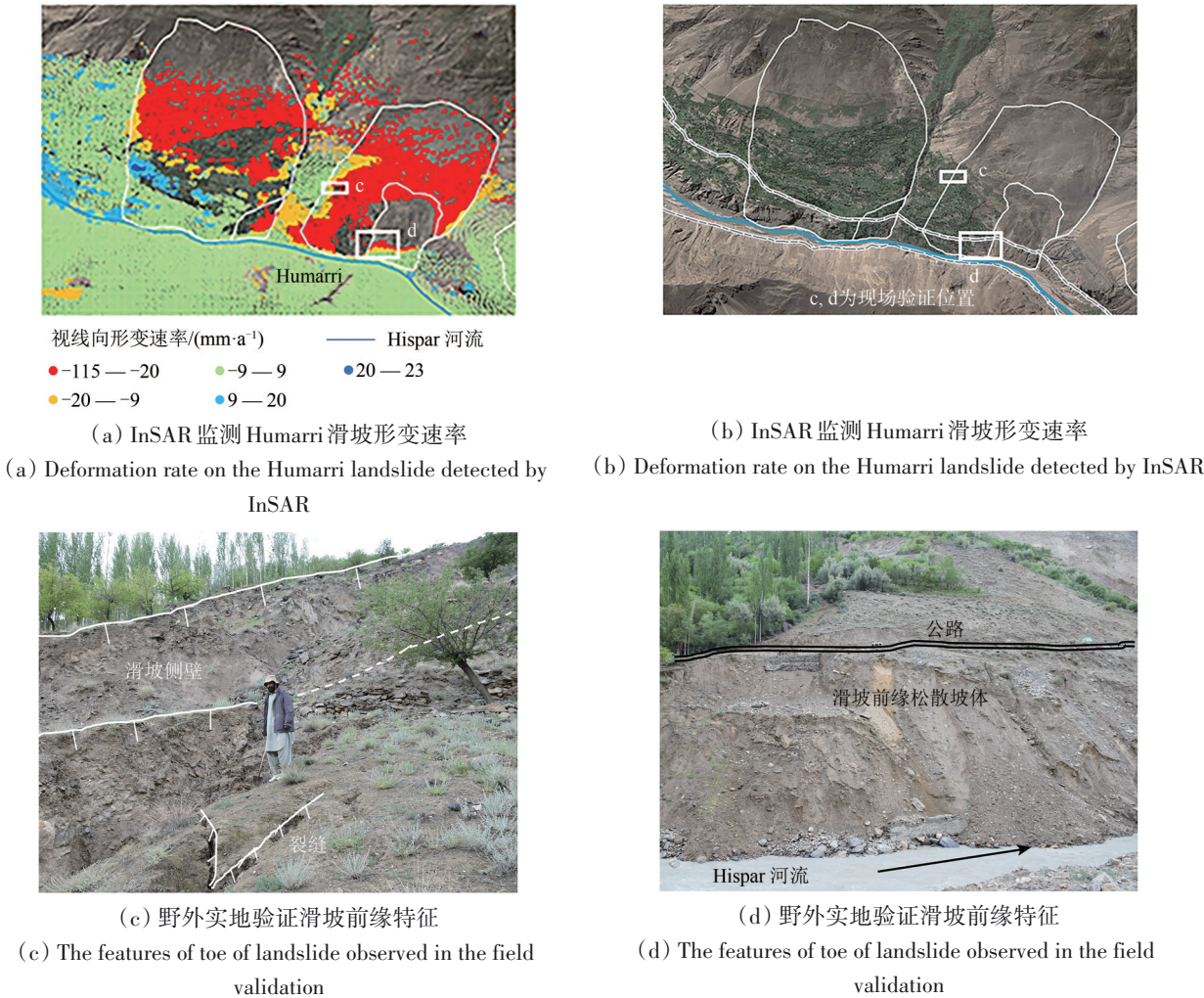


图 10 Humarri 滑坡监测形变速率、遥感影像解译特征和野外实地验证特征

Fig. 10 Deformation rate detected by InSAR, features interpreted from optical remote sensing image and photos from field validation of Humarri landslide

4.4 洪扎河谷滑坡发育分布特征

滑坡的发育受到地形地貌、地质构造、水文植被等因素的综合作用与控制，从而在空间上也呈现一定的分布特征。为了研究滑坡的发育和分布特征，统计分析了潜在滑坡与海拔、高差、坡度、坡向、降水、NDVI、距断层距离、距震中距离、距道路距离、岩性和土地覆盖类型等内外因素的关系（图 11—图 14）。

海拔高度及地形高差影响斜坡体的稳定状态，一般地，斜坡高差越大，坡体因重力作用而失稳的可能越大。洪扎河谷潜在滑坡主要集中分布在

平均高程 2000—3000 m，高差 200—1000 m 范围内（图 13（a）（b）），可见在一定地形起伏条件中，滑坡分布具有一定聚集特征，即地形海拔起伏对滑坡发育起到一定的控制作用。极高海拔（>3000 m）和大起伏区域距离河谷较远，主要为林地、冰川积雪覆盖的极高山区域，因此，较少滑坡发育。

坡度、坡向为主要影响和控制滑坡发育和位置的地形条件，识别的滑坡主要分布在坡度 25°—40°范围（占 86.8%），其中，在 35°—40°坡度条件下，滑坡分布数量达到峰值（22 处，占 41.5%）

(图 13 (c))。对滑坡坡向分布进行统计,发现东向至西向的斜坡较易发育滑坡(44处,占83%) (图 13 (d))。而升、降轨不同数据所监测的滑坡在坡向特征上存在明显的区别,升轨数据监测滑坡主要发育在东、南东、南向斜坡,在南向斜坡

上的滑坡占升轨识别滑坡总数的36%。降轨数据所识别的滑坡主要发育在南西、西、北西斜坡,其中在南西向斜坡上的滑坡占降轨数据识别滑坡总数的39% (图 13 (d))。

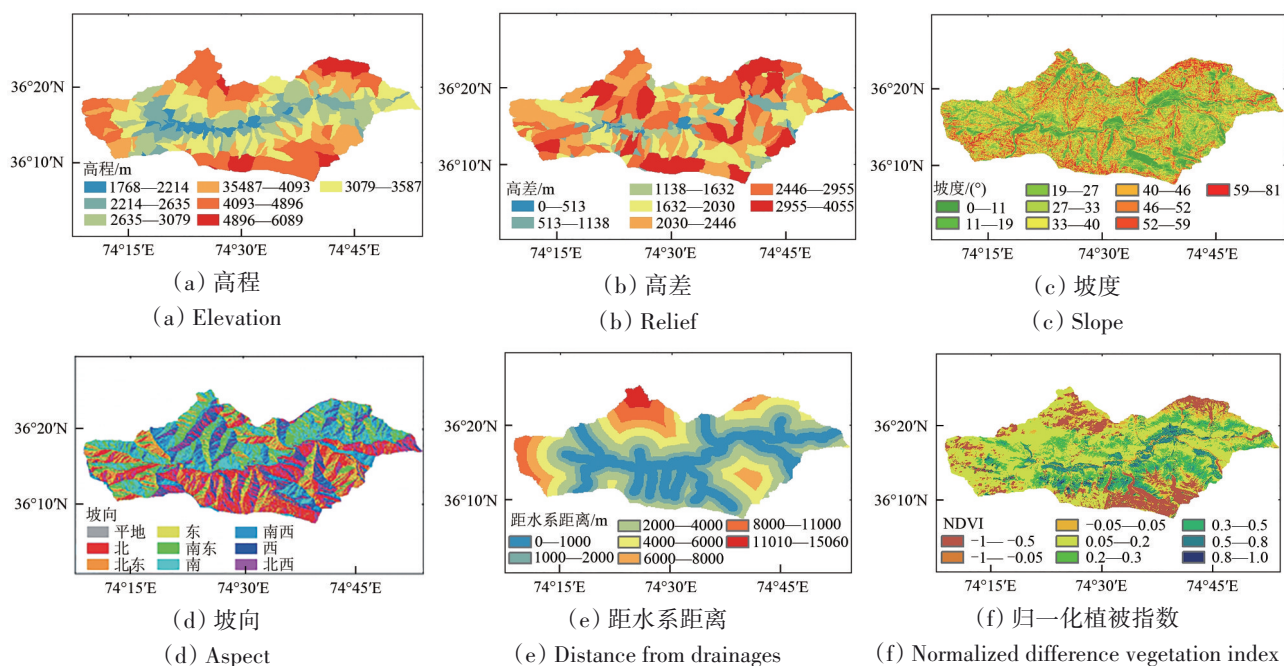


图 11 滑坡发育相关地形及水文植被因子

Fig. 11 Condition factors of Landform and hydrological vegetation related to landslides development

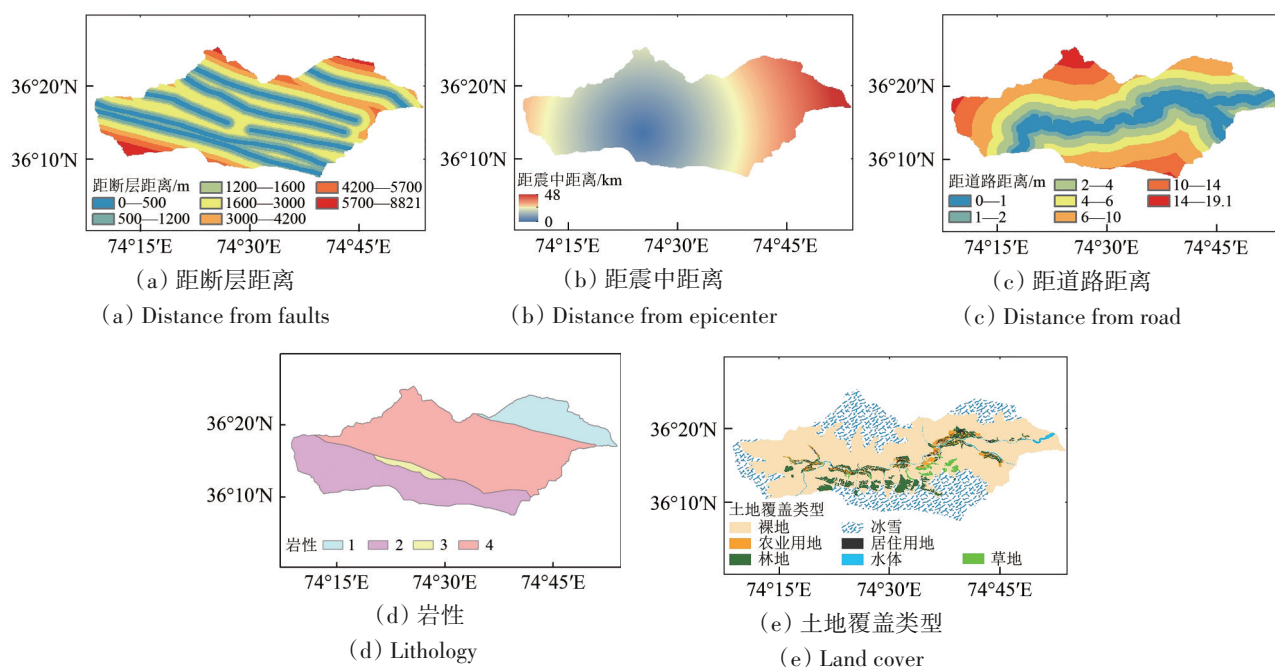


图 12 滑坡发育相关地质构造及土地覆盖因子

Fig. 12 Condition factors of geological structure and land cover related to landslides development

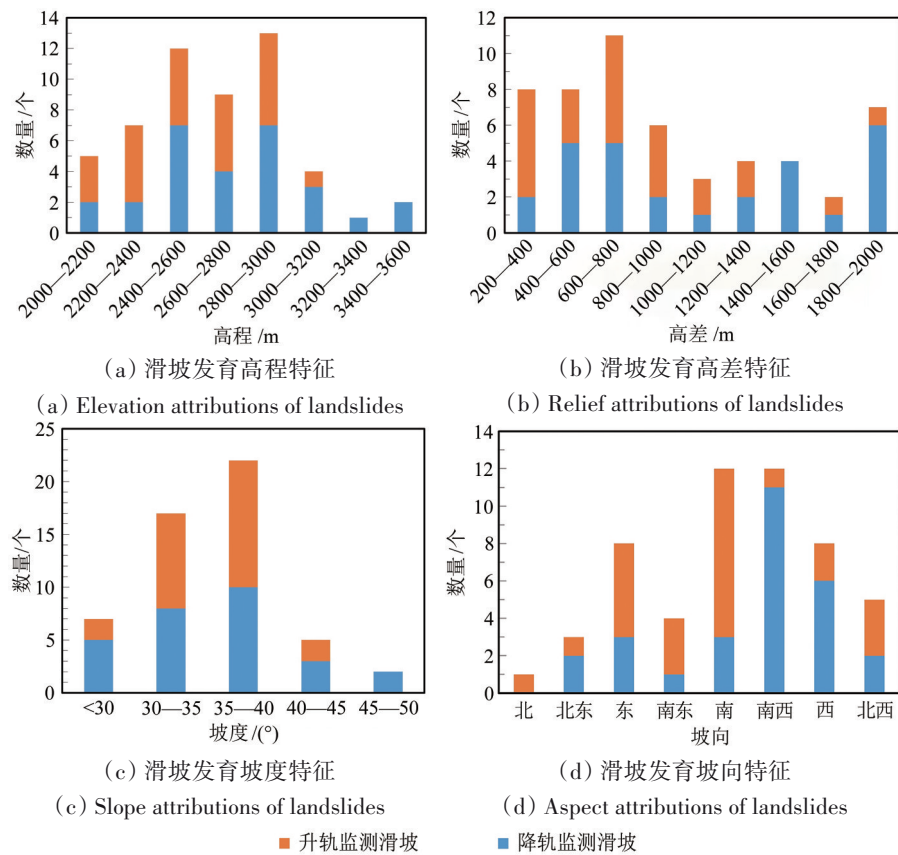


图 13 不同地形条件下滑坡发育特征

Fig. 13 Characteristics of landslide development under different terrain conditions

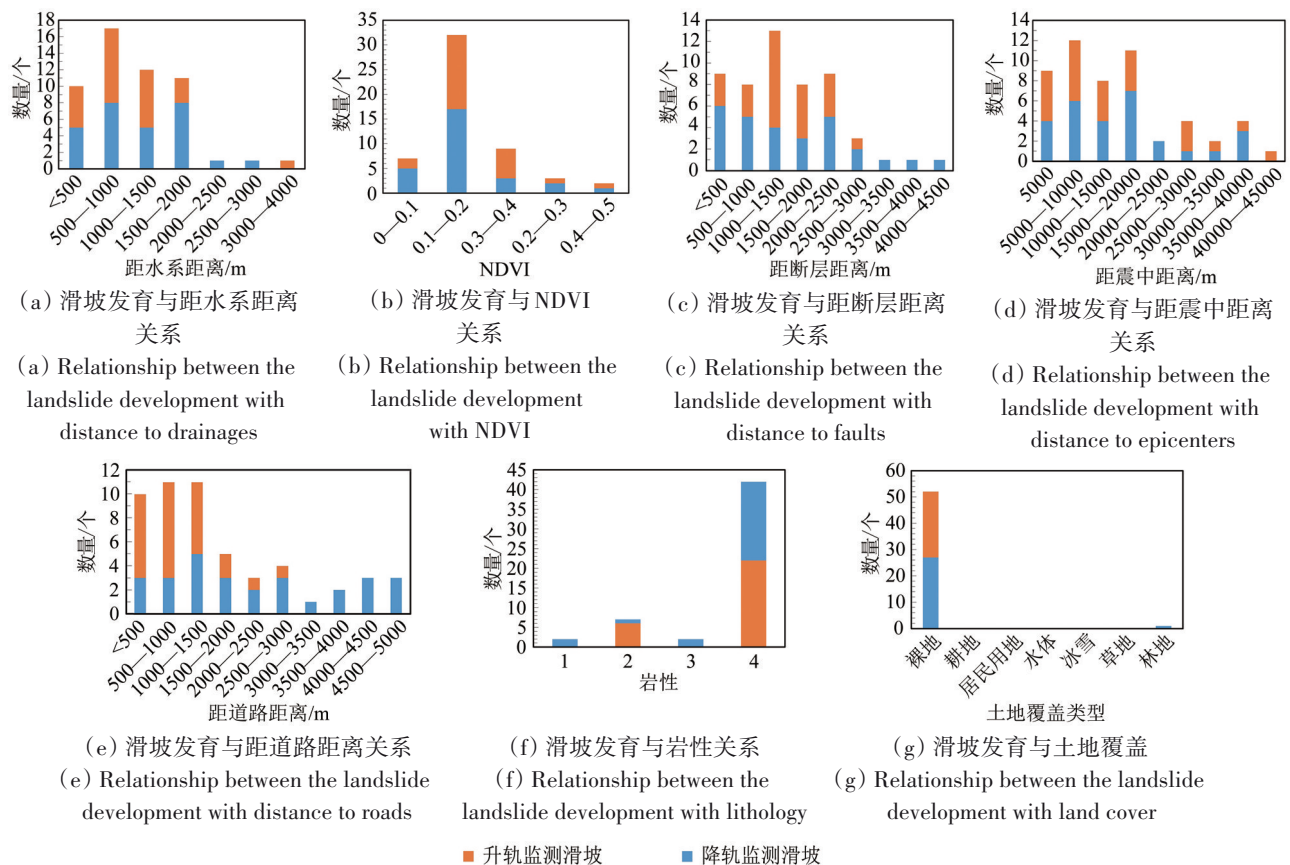


图 14 不同水文植被地质环境条件下滑坡发育特征

Fig. 14 Characteristics of landslide development under different hydrological and geological environment conditions

河流水系长期侵蚀作用不仅软化坡脚，且使坡体逐渐变陡，坡体重力作用增强，稳定性降低。植被生长可以反应斜坡完整度，植被覆盖良好的斜坡一般较不易受到降水侵蚀和风化破坏。滑坡主要发育在距水系 2 km 以内，NDVI<0.2 的条件(图 14 (a)(b))。基于距离统计分析，滑坡主要发育在距离断层 2.5 km、距离震中 20 km、距离道路 1.5 km 以内的区域内，距离越近，斜坡受到扰动的概率越大，滑坡发育条件更加充足 (图 14 (c)(d)(e))。

岩性反映着斜坡岩土体强度和受内外力作用时的抗侵蚀风化能力。土地覆盖类型表征地表地物的分布，在不同类型的用地区，滑坡易发性不一。将研究区岩性进行分类(表 2)，统计发现，滑坡主要发育在植被生长较差、板岩、千枚岩等变质岩类、及其碎屑堆积分布区域，这类岩土体较易因为坡面侵蚀、降水入渗作用产生节理、风化，造成斜坡完整性破坏，并为滑坡崩塌的发育提供物质来源(图 14 (f))。从滑坡所在用地类型角度分析(图 14 (g))，绝大多数滑坡发育在裸地，因为裸露地表更易因降水侵蚀、风化作用而破碎、崩解，发生崩塌、滑坡，这与以往的认知一致。

表 2 研究区岩性分类
Table 2 The categories of lithology in the study area

组别	主要岩性
1	花岗闪长岩
2	火山岩碎屑岩偶夹片岩、板岩
3	火山岩、灰岩
4	板岩、千枚岩

综上，洪扎河谷滑坡发育主要受到岩性控制，较软弱易分化的变质岩类区，斜坡主要为裸露基岩和碎石土，植被覆盖与生长同样较差，为滑坡发育提供了充足的物源。海拔及高差、坡度、坡向等地形因素主要控制着滑坡的分布，中等坡度 30°—40°和坡向南、南西向为滑坡发育的优势地形条件。距道路、水系、断层及震中越近，滑坡越容易发育。

5 结 论

本研究基于 SBAS-InSAR 技术和升降轨 Sentinel-1A 数据监测洪扎河谷地表形变信息，基于形变数据，结合光学遥感解译与野外调查验证完成了中

巴经济走廊洪扎段的潜在滑坡的早期识别研究，进一步分析了洪扎河谷滑坡的发育特征。主要结论如下：

(1) 本研究基于 SBAS-InSAR 技术获得洪扎河谷地表不稳定形变阈值为 -20 mm/a，形变区域主要集中在河谷两岸、公路上下边坡，在支沟中也有分布。

(2) 通过 SBAS-InSAR 监测形变叠加光学遥感解译和野外验证调查，识别得到洪扎河谷 53 处潜在滑坡，主要分布在基岩风化、堆积层发育的斜坡地段。据调查及光学遥感影像解译，所识别滑坡具备陡峭后壁、裂缝、陡坎发育和破碎的岩土体等特征。

(3) 滑坡发育主要受到断层控制，较软弱的变质岩类区域，斜坡地表裸露、易风化破碎，植被稀疏，为滑坡发育提供了充足的物源，滑坡相对更为发育；高差 200—1000 m、坡度 30°—40°和坡向南、南西向为滑坡发育的优势地形条件；在裸露基岩和碎石土斜坡，滑坡最为多发。

(4) 本研究经调查与对比研究证实升、降轨数据的不同观测几何保证了较全面的形变监测，是全面识别山区滑坡隐患的有效方法，在相同区域，有 72% 的识别滑坡与学者解译结果相符。说明区内大部分滑坡长期处于变形状态，成为主要灾害隐患；一些斜坡体由于侵蚀、人类活动等因素而变形并逐步发育。在东西走向洪扎河谷区，今后可以利用升轨数据对东、南东、南向的滑坡可进行长期重点监测，对南西、西向的滑坡，则可用降轨数据开展有效、针对性监测。

研究结果可用于巴基斯坦洪扎河谷防灾减灾工作，可为中巴经济走廊的畅通运营、滑坡重点监测和评价研究提供科学参考和数据支持。研究中的统计特征也与滑坡数据有关，因为本研究主要识别了河谷区及支沟中与人类居住地、公路设施等较近的滑坡。在进一步的研究中，应该利用高分辨率 SAR 数据在长时间尺度上进行监测，研究典型滑坡形变时空特征、发展演化及破坏特征。并对毁路、堵江的滑坡进行重点监测、模拟和评价研究，以为防灾减灾关键技术和能力提升提供数据和技术支撑，为中巴经济走廊的安全运营和当地人身财产安全提供科学保障。

参考文献 (References)

- Ahmed M F and Rogers J D. 2014. First-approximation landslide inventory maps for northern pakistan, using ASTER DEM data and geomorphic indicators. *Environmental and Engineering Geoscience*, 20(1): 67-83 [DOI: 10.2113/gsegeosci.20.1.67]
- Ahmed M F, Rogers J D and Bakar M Z A. 2016. Hunza river watershed landslide and related features inventory mapping. *Environmental Earth Sciences*, 75(6): 523 [DOI: 10.1007/s12665-015-5172-2]
- Ali S, Biermanns P, Haider R and Reicherter K. 2019. Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China-Pakistan economic corridor (Karakoram Highway), Pakistan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(5): 999-1022 [DOI: 10.5194/nhess-19-999-2019]
- Ali S, Schneiderwind S and Reicherter K. 2017. Structural and climatic control of mass movements along the karakoram highway//4th World Landslide Forum Organized by the International Consortium on Landslides. Ljubljana: Springer: 509-516. [DOI: 10.1007/978-3-319-53485-5_60]
- Ardizzone F, Cardinali M, Carrara A, Guzzetti F and Reichenbach P. 2002. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2): 3-14 [DOI: 10.5194/nhess-2-3-2002]
- Bacha A S, Shafique M and van der Werff H. 2018. Landslide inventory and susceptibility modelling using geospatial tools, in hunza-nagar valley, northern Pakistan. *Journal of Mountain Science*, 15(6): 1354-1370 [DOI: 10.1007/s11629-017-4697-0]
- Berardino P, Costantini M, Franceschetti G, Iodice A, Pietranera L and Rizzo V. 2003. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 68(1/2): 31-51 [DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00197-7]
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/tgrs.2002.803792]
- Bontemps N, Lacroix P, Larose E, Jara J and Taipei E. 2020. Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state. *Nature Communications*, 11(1): 780 [DOI: 10.1038/s41467-020-14445-3]
- Costantini M. 1998. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 813-821 [DOI: 10.1109/36.673674]
- Derbyshire E, Fort M and Owen L A. 2001. Geomorphological hazards along the karakoram highway: khunjerab pass to the Gilgit River, Northernmost Pakistan. *Erdkunde*, 55(1): 49-71 [DOI: 10.3112/erdkunde.2001.01.04]
- Fraser J E, Searle M P, Parrish R R and Noble S R. 2001. Chronology of deformation, metamorphism, and magmatism in the southern Karakoram mountains. *GSA Bulletin*, 113(11): 1443-1455 [DOI: 10.1130/0016-7606(2001)113<1443:codmam>2.0.co;2]
- Froude M J and Petley D N. 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8): 2161-2181 [DOI: 10.5194/nhess-18-2161-2018]
- Gabriel A K, Goldstein R M and Zebker H A. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7): 9183-9191 [DOI: 10.1029/JB094iB07p09183]
- Goldstein R M and Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21): 4035-4038 [DOI: 10.1029/1998GL900033]
- Guzzetti F, Cardinali M, Reichenbach P and Carrara A. 2000. Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber river Basin, Central Italy. *Environmental Management*, 25(3): 247-263 [DOI: 10.1007/s002679910020]
- Haque U, Blum P, Da Silva P F, Andersen P, Pilz J, Chalov S R, Malet J P, Auflič M J, Andres N, Poyiadji E, Lamas P C, Zhang W Y, Peshovski I, Pétursson H G, Kurt T, Dobrev N, García-Davalillo J C, Halkia M, Ferri S, Gaprindashvili G, Engström J and Keellings D. 2016. Fatal landslides in europe. *Landslides*, 13(6): 1545-1554 [DOI: 10.1007/s10346-016-0689-3]
- Hooper A. 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16): L16302 [DOI: 10.1029/2008gl034654]
- Hussain M L, Shafique M, Bacha A S, Chen X Q and Chen H Y. 2021. Landslide inventory and susceptibility assessment using multiple statistical approaches along the Karakoram highway, northern Pakistan. *Journal of Mountain Science*, 18(3): 583-598 [DOI: 10.1007/s11629-020-6145-9]
- Intrieri E, Carlà T and Gigli G. 2019. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: a literature review. *Earth-Science Reviews*, 193: 333-349 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.03.019]
- Kamp U, Owen L A, Growley B J and Khattak G A. 2010. Back analysis of landslide susceptibility zonation mapping for the 2005 Kashmir earthquake: an assessment of the reliability of susceptibility zoning maps. *Natural Hazards*, 54(1): 1-25 [DOI: 10.1007/s11069-009-9451-7]
- Kang Y, Lu Z, Zhao C Y, Xu Y K, Kim J W and Gallegos A J. 2021. InSAR monitoring of creeping landslides in mountainous regions: A case study in Eldorado National Forest, California. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112400 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112400]
- Kang Y, Zhao C Y, Zhang Q, Lu Z and Li B. 2017. Application of InSAR techniques to an analysis of the Guanling landslide. *Remote Sensing*, 9(10): 1046 [DOI: 10.3390/rs9101046]
- Keefer D K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes-a historical review. *Surveys in Geophysics*, 23(6): 473-510 [DOI: 10.1023/A:1021274710840]
- Lanari R, Zeni G, Manunta M, Guarino S, Berardino P and Sansosti E. 2004. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case study of the city of Naples, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14): 2855-2867 [DOI: 10.1080/01431160310001647750]
- Li X E, Zhou L, Su F Z and Wu W Z. 2021. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects. *National*

- Remote Sensing Bulletin, 25(2): 614-629 (李晓恩, 周亮, 苏奋振, 吴文周. 2021. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展. 遥感学报, 25(2): 614-629) [DOI: 10.11834/jrs.20209297]
- Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 332-341 (廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国. 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. 遥感学报, 25(1): 332-341) [DOI: 10.11834/jrs.20210162]
- Liu X J, Zhao C Y, Zhang Q, Lu Z, Li Z H, Yang C S, Zhu W, Jing L Z, Chen L Q and Liu C J. 2021. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR datasets for mapping active landslides along the Jinsha River corridor, China. Engineering Geology, 284: 106033 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106033]
- Martha T R, van Westen C J, Kerle N, Jetten V and Kumar K V. 2013. Landslide hazard and risk assessment using semi-automatically created landslide inventories. Geomorphology, 184: 139-150 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.12.001]
- Meusburger K and Alewell C. 2009. On the influence of temporal change on the validity of landslide susceptibility maps. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(4): 1495-1507 [DOI: 10.5194/nhess-9-1495-2009]
- Qing F, Zhao Y, Meng X M, Su X J, Qi T J and Yue D X. 2020. Application of machine learning to debris flow susceptibility mapping along the China-Pakistan karakoram highway. Remote Sensing, 12(18): 2933 [DOI: 10.3390/rs12182933]
- Rehman M U, Zhang Y, Meng X M, Su X J, Catani F, Rehman G, Yue D X, Khalid Z, Ahmad S and Ahmad I. 2020. Analysis of landslide movements using interferometric synthetic aperture radar: a case study in Hunza-Nagar valley, Pakistan. Remote Sensing, 12(12): 2054 [DOI: 10.3390/rs12122054]
- Schlögel R, Doubre C, Malet J P and Masson F. 2015. Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: a D-InSAR geomorphological interpretation method. Geomorphology, 231: 314-330 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.11.031]
- Schmidt D A and Bürgmann R. 2003. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B9): 2416 [DOI: 10.1029/2002jb002267]
- Searle M P, Khan M A, Fraser J E, Gough S J and Jan M Q. 1999. The tectonic evolution of the Kohistan-Karakoram collision belt along the Karakoram Highway transect, north Pakistan. Tectonics, 18(6): 929-949 [DOI: 10.1029/1999tc900042]
- Shafique M, Van Der Meijde M and Khan M A. 2016. A review of the 2005 Kashmir earthquake-induced landslides; from a remote sensing prospective. Journal of Asian Earth Sciences, 118: 68-80 [DOI: 10.1016/j.jseas.2016.01.002]
- Su X J, Zhang Y, Jia J, Liang Y W, Li Y X and Meng X M. 2021. InSAR-based monitoring and identification of potential landslides in Lueyang County, the Southern Qinling Mountains, China. Mountain Research, 39(1): 59-70 (苏晓军, 张毅, 贾俊, 梁懿文, 李媛茜, 孟兴民. 2021. 基于 InSAR 技术的秦岭南部略阳县潜在滑坡灾害识别研究. 山地学报, 39(1): 59-70) [DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000576]
- Su X J, Zhang Y, Meng X M, Yue D X, Ma J H, Guo F Y, Zhou Z Q, Rehman M U, Khalid Z, Chen G, Zeng R Q and Zhao F M. 2021. Landslide mapping and analysis along the China-Pakistan Karakoram Highway based on SBAS-InSAR detection in 2017. Journal of Mountain Science, 18(10): 2540-2564 [DOI: 10.1007/s11629-021-6686-6]
- Verma R K and Sekhar C C. 1986. Focal mechanism solutions and nature of plate movements in Pakistan. Journal of Geodynamics, 5: 331-351 [10.1016/0264-3707(86)90013-X]
- Yang Z Q, Zhu Y Y, Qian S G and Hou K P. 2016. Types and space distribution characteristics of debris flow disasters along China-Pakistan highway. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 21: 191-200
- Yang Z Q, Zhu Y Y, Zou D H S and Liao L P. 2011. Activity degree evaluation of glacial debris flow along international karakorum highway (KKH) based on fuzzy theory. Advanced Materials Research, 261-263: 1167-1171 [DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.1167]
- Zhang Y D, Li Y D, Dong J, Fan Q, Che B, Zhang L, Zhou Y and Liao M S. 2019. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 23(5): 987-996 (张亚迪, 李煜东, 董杰, 范强, 车彬, 张路, 周杨, 廖明生. 2019. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患. 遥感学报, 23(5): 987-996) [DOI: 10.11834/jrs.20198025]
- Zhao C Y, Zhang Q, He Y, Peng J B, Yang C S and Kang Y. 2016. Small-scale loess landslide monitoring with small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar technique—case study of Xingyuan landslide, Shaanxi, China. Journal of Applied Remote Sensing, 10(2): 026030 [DOI: 10.1117/1.jrs.10.026030]
- Zhao F M, Meng X M, Zhang Y, Chen G, Su X J and Yue D X. 2019. Landslide susceptibility mapping of Karakorum highway combined with the application of SBAS-InSAR technology. Sensors, 19(12): 2685 [DOI: 10.3390/s19122685]
- Zhao F M, Zhang Y, Meng X M, Su X J and Shi W. 2020. Early identification of geological hazards in the Gaizi valley near the Karakoram Highway based on SBAS-InSAR technology. Hydrogeology and Engineering Geology, 47(1): 142-152 (赵富萌, 张毅, 孟兴民, 苏晓军, 石伟. 2020. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别. 水文地质工程地质, 47(1): 142-152) [DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201902020]
- Zhang Y D, Li Y D, Dong J, Fan Q, Che B, Zhang L, Zhou Y and Liao M S. 2019. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 23(5): 987-996 (张亚迪, 李煜东, 董杰, 范强, 车彬, 张路, 周杨, 廖明生. 2019. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患. 遥感学报, 23(5): 987-996) [DOI: 10.11834/jrs.20198025]

Potential landslides identification and development characteristics analysis in Hunza valley , along China–Pakistan Economic Corridor based on SBAS–InSAR

SU Xiaojun^{1,3,4}, ZHANG Yi^{2,3}, MENG Xingmin^{2,3,4}, REHMAN Mohib Ur^{1,3,4}, KHALID Zainab^{1,3,4}, ZHAO Fumeng^{1,3,4}, YUE Dongxia^{1,3,4}, GUO Fuyun^{1,3,4}, ZHOU Ziqiang⁵

1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Technology & Innovation Centre for Environmental Geology and Geohazards Prevention, Lanzhou 730000, China;

4. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou 730000, China;

5. Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

6. Institute of Geological Hazards Prevention, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The Hunza Valley in the China – Pakistan Economic Corridor (CPEC) in the northern part of Pakistan has a high relief and harsh geo-environment. Villages and towns in this area are prone to geohazard development, and high-risk incidents have been observed from the construction to operation stages of the CPEC. Landslide hazards in the Hunza Valley must be investigated and analyzed via landslide inventories and landslide development tools. This study applied 45 images and 42 images from the ascending and descending Sentinel-1A datasets, respectively, to monitor surface deformation via SBAS-InSAR. The deformation information along the slope direction was subsequently estimated. On the basis of the displacement rates derived from the SAR data, the optical remote sensing images were visually interpreted, and in situ surveys and validations were conducted. A total of 53 potential landslides were detected and delineated. On the basis of the effects of landslide identification and the detected deformation, image interpretation and validation features of typical large landslides Ghulmet and Humarri, 11 factors related to geomorphology, geology, hydrology, and vegetation were analyzed for landslide development. Maximum displacement velocities of -311 and -490 mm/a along the slope were detected on the basis of the ascending and descending datasets, respectively. Consequently, an annual deformation velocity of 20 mm/a was set as the threshold for the detection and mapping of potential landslides in the Hunza River Valley. The deformation of large landslides is severe under the influence of Hunza River erosion, and secondary landslides are developed. The validated potential landslides are distributed on the slopes on both sides of the Hunza River and are sometimes on the upper and lower slopes of the road. These active landslides primarily are developed in metamorphic rocks such as phyllite and slate. In the CPEC, landslides preferentially form and deform in areas where the elevation relief is between 200 and 1000 m, the slope is between 30° and 40°, and the aspect is within the southern and southwestern regions. Given the bare area of slope surfaces and sparse vegetation (NDVI<0.2), weathered and fragmented slopes provide enough provenance and materials for landslide development. The outcomes and results may facilitate hazard management and risk reduction in the Hunza Valley, allowing the operation of the CPEC to be uninterrupted. The findings of this work can also provide scientific references and data support for the monitoring and assessments of major landslide disasters that destroy roads and block rivers and their resulting secondary disaster events.

Key words: China-Pakistan Economic Corridor, Hunza River valley, landslide, SBAS-InSAR, Earth surface deformation, early identification, development characteristics

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC1501005); Science and Technology Planning Project of Gansu Province (No. 18YF1WA114); Science and Technology Major Project of Gansu Province (No. 19ZD2FA002); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. lzujbky-2021-ey05)