

白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究

李媛茜^{1,3}, 张毅^{1,3}, 苏晓军^{2,3}, 赵富萌^{2,3}, 梁懿文^{1,3}, 孟兴民^{1,3,4},
贾俊⁵

1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000;
2. 兰州大学 资源环境学院, 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. 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
5. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054

摘要: 白龙江流域地处甘肃省东南部, 位于青藏高原、黄土高原和四川盆地的交汇处。区内断裂构造发育、新构造运动活跃、地震频繁, 加之多见的暴雨和持续降雨天气, 使得流域内地质灾害频发, 且分布范围广泛, 其中以滑坡、泥石流灾害较为显著。本研究基于合成孔径雷达干涉测量技术, 对白龙江流域进行区域尺度上的时序地表变形监测, 得出2018年—2019年雷达视线方向的形变速率范围为-158—110 mm/a, 并在人口分布集中的河谷区圈定出潜在滑坡点共计114处, 并进行野外验证。统计发现研究区潜在滑坡多集中分布于两岸坡度20°—40°、坡向135°—270°、高差小于150 m、面积小于 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的千枚岩等软弱岩层中。牙豁口滑坡发生破坏前, 滑坡中上部变形剧烈, 变形速率达38 mm/a, 于07-19在该区域剪出并不断向下推移, 最终进入岷江。结合滑前的变形特征和滑坡地貌, 将牙豁口滑坡分为搬运区、流通区和堆积区。该滑坡事件证明了InSAR技术在潜在滑坡早期识别中的有效性和可靠性。本研究可为白龙江流域的滑坡调查、综合治理和防灾减灾提供科学依据和参考。

关键词: 白龙江流域, 潜在滑坡, InSAR技术, 地表形变, 早期识别, 发育特征, 牙豁口滑坡

引用格式: 李媛茜, 张毅, 苏晓军, 赵富萌, 梁懿文, 孟兴民, 贾俊. 2021. 白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究. 遥感学报, 25(2): 677-690

Li Y X, Zhang Y, Su X J, Zhao F M, Liang Y W, Meng X M and Jia J. 2021. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique. National Remote Sensing Bulletin, 25(2): 677-690 [DOI: 10.11834/jrs.20210094]

1 引言

近几十年来, 随着极端天气的频繁出现, 全球自然灾害发生率急剧增加 (Lee 等, 2020)。其中, 滑坡灾害造成了重大的人员伤亡和经济损失, 自1995年—2014年的20年间, 全球共有3876个滑坡造成163658人死亡, 11689人受伤 (Haque 等, 2019)。白龙江流域地处青藏高原、黄土高原以及四川盆地的交汇处 (李淑贞 等, 2015), 构造应力复杂多样, 构造活动较为频发, 滑坡、泥石流灾害极其发育, 给流域内居民的社会经济建设、

生产生活带来了极大的影响。受坪定—化马等构造断裂带的控制和地震的影响 (杨为民 等, 2014), 白龙江流域不同区段发育有特大型到小型等不同规模的滑坡 (唐新凯, 2014), 如舟曲泄流坡滑坡, 20世纪以来已发生多次滑动 (余志山, 2007); 锁儿头滑坡自20世纪70年代复活后一直处于缓慢活动中, 中部和前缘存在明显位移 (蒋秀姿 等, 2015; 蒋树 等, 2016)。白龙江流域多高山峡谷地貌, 河谷狭窄更易发生滑坡堵江等灾害 (陈明, 2017), 因此, 急需在该区域开展潜在滑坡早期识别和发育、分布特征研究。

收稿日期: 2020-05-08; 预印本: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2017YFC1501005); 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-2019-28, lzujbky-2020-sp03); 自然资源部中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20190714)

第一作者简介: 李媛茜, 1996年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感与地质灾害。E-mail: liyq19@lzu.edu.cn

通信作者简介: 张毅, 1991年生, 男, 讲师, 研究方向为环境遥感与地质灾害。E-mail: zhangyigeo@lzu.edu.cn

近年来,随着雷达遥感的不断发展(郭华东和张露,2019),合成孔径雷达干涉测量(Synthetic Aperture Radar Interferometry)成为一种监测区域地表形变和早期识别滑坡的有效手段(Guzzetti等,2009),具有全天时全天候、高精度、高分辨率等特点(张云俊等,2015)。为了克服传统差分干涉测量存在的空间失相关和大气延迟的问题,学者们提出时序InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)技术,对同一地区不同时间获取的SAR影像中的高相干点目标进行时序分析,获得在时间上连续的雷达视线向的地表形变(王腾和廖明生,2018)。特别是由Berardino等于2002年提出的小基线集SBAS(Small Baselines Subset)InSAR技术,选取空间基线、时间基线都较小的干涉对,有效减小了由过长的时空基线而引起的失相干,提高了监测的时间采样率(Berardino等,2002;张亚迪等,2019),已在沉降监测、高山峡谷区的滑坡早期识别等方面得到了广泛使用(肖亮等,2019;Guzzetti等,2009;赵富萌等,2019)。

本文以SBAS-InSAR技术为支撑,使用Sentinel-1A微波遥感数据,对白龙江流域进行地表变形监测,计算获取区域尺度上的地表变形速率,结合遥感解译圈定潜在滑坡,并进行野外考察验证。在此基础上,对潜在滑坡的坡度、坡向、高差等发育、分布特征进行统计分析,得到控制和影响该区潜在滑坡发育的主要条件。为区域尺度上潜在滑坡的识别和发育及分布特征研究提供了科学的思路和方法,为白龙江流域的防灾减灾和应急管理提供了一定的参考。

2 研究区概况

白龙江流域地处中国大陆二级阶梯向三级阶梯的过渡地带(杜国梁等,2016),位于甘肃省东南部,属于青藏高原向秦巴山地和黄土高原过渡的地区,为长江支流嘉陵江的一级支流,流域面积1.8万km²。白龙江地区构造位置独特,在板块构造上位于西藏—三江造山系、扬子陆块区和秦祁昆造山系交汇区以及青藏高原东部边界(潘桂堂等,2009),并经历了加里东、海西、印支、燕山运动等多期构造演化。活跃频繁的构造活动使得研究区内的地层较为复杂,主要出露有志留纪、石炭纪、泥盆纪、三叠纪、白垩纪、第四纪等地

层,岩性以千枚岩、板岩、砂岩、灰岩和泥灰岩等为主(张毅,2018)。

流域地势西北高东南低,海拔556—5339 m(图1),地形地貌复杂,高山峡谷地貌、黄土地貌相间分布。流域内气候条件良好,年平均气温在2—15℃,年平均降水量在700 mm左右(张金茜等,2018)。受特殊的地貌、地质、气候等因素影响,该区已经成为中国4大地质灾害高发区之一(孟兴民等,2013),一些大型滑坡已对人类生产生活造成了不同程度的影响,严重者存在堵江风险。例如2018-07月发生在流域内的南峪江顶崖滑坡,滑坡堆积体造成白龙江南峪乡段河道堵塞,形成堰塞湖并阻断国道线(郭长宝等,2019)。

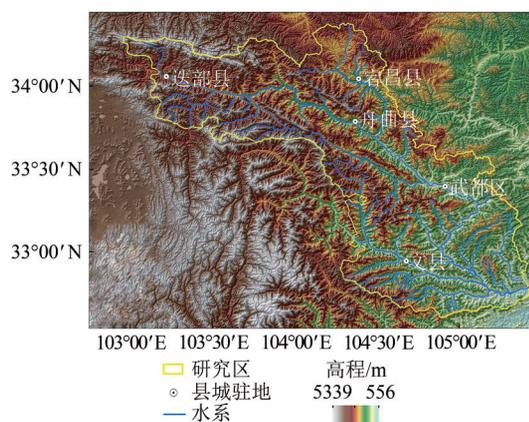


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of study area

3 方法和数据

本研究主要针对白龙江流域干流及其主要支流的河谷区,以人口分布密集的河谷地区为主要研究区域,进行小基线集干涉处理。选取2018-03—2019-03的60景Sentinel-1A数据,数据均沿同一降轨(62轨道)获取,C波段(波长5.6 cm),成像方式采用IW(Interferometric Wide swath)干涉幅宽成像模式、VV同向极化方式。如图2所示,白色实线为本文研究区域,红色框为Sentinel-1A影像的覆盖范围。

同时为了提升数据处理效率,尽量降低区域复杂地形引起的误差,将研究区分为8块(图3),分别设置时空基线(表1),进行以下处理流程:首先对数据进行裁剪、采用多幅主影像,以短时空基线为阈值生成干涉像对连接图,借助空间分辨率为30 m美国宇航局(NASA)的SRTM DEM数

据去除地形相位, 并进行差分干涉处理; 再依据相干性阈值 (0.35) 选取高相干点, 选择最小费用流方法进行相位解缠, 利用 Goldstein 滤波对干涉影像进行滤波处理以过滤噪声和提高相干性; 筛选剔除区域相关性过低和解缠错误的像对, 利用地面控制点和外部 DEM 进行轨道精炼和重去平; 用最小二乘法和矩阵奇异值分解进行变形反演; 最后利用时间域的高通滤波和空间域的低通滤波去除大气相位影响, 得到研究区长时间序列形变信息 (Berardino 等, 2002; Schmidt 和 Burgmann, 2003)。基于监测结果, 进一步圈定潜在滑坡并进行野外验证, 对每一潜在滑坡所在的坡度坡向、地形高差、岩性及是否受构造活动影响等因素进行分析, 从而得到此区潜在滑坡的分布特征。



图2 Sentinel-1A 数据覆盖范围
Fig. 2 Coverage of Sentinel-1A data

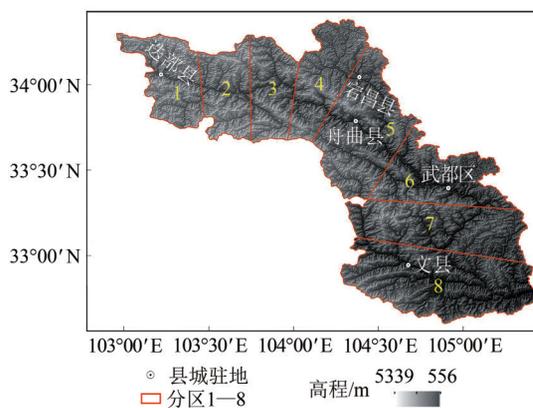


图3 数据处理分区
Fig. 3 Divided the Bailong River Basin into 1-8 blocks

4 结果与分析

4.1 地表变形监测结果

基于 SBAS-InSAR 技术, 以相干目标像元的空间相干性为筛选标准, 在保证像元密度的前提下, 设置输出的相干性阈值为 0.6, 得到 1641736 个相干

目标点, 研究区平均相干目标点密度为 91 个/ km^2 , 但是在重点研究的白龙江河谷区, 相干目标点密度可达 214 个/ km^2 。得到白龙江流域沿雷达视线方向 LOS (Light of Sight) 地表形变 (图 4)。结果显示 2018-03—2019-03 白龙江全流域 LOS 向变形速率范围为 -158 — 110 mm/a, 正值表示地物目标变形为沿雷达视线方向接近雷达, 负值表示沿雷达视线方向远离雷达 (表 1)。变形结果覆盖了白龙江流域干流河谷区及主要支流区的大多数城镇及附近区域, 以上游迭部县城开始, 经舟曲县城、中游段的武都区, 至下游的文县等主要城镇均有分布。

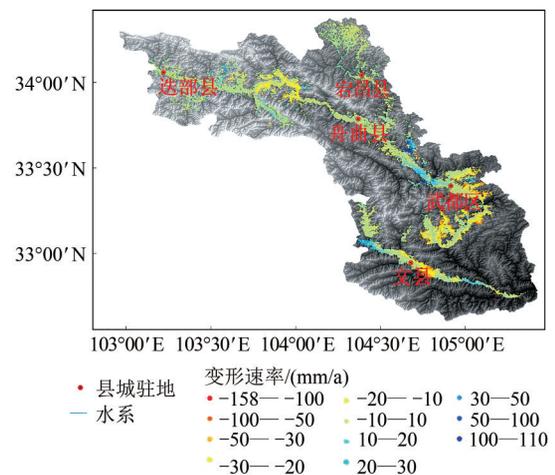


图4 基于 SBAS-InSAR 技术的白龙江流域地表变形监测结果
Fig. 4 Ground deformation of Bailong River basin obtained by SBAS-InSAR technology

表 1 基线设置和变形监测结果

Table 1 Baseline settings and monitoring results for each block

| 分区 | 最大空间基线/m | 最大时间基线/d | 形变速率范围/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) |
|----|----------|----------|--|
| 1 | 55 | 27 | -54—110 |
| 2 | 54 | 26 | -134—62 |
| 3 | 55 | 27 | -158—51 |
| 4 | 58 | 26 | -110—43 |
| 5 | 54 | 21 | -81—91 |
| 6 | 57 | 23 | -101—68 |
| 7 | 60 | 27 | -102—51 |
| 8 | 56 | 28 | -81—64 |

区分稳定斜坡和潜在滑坡的变形速率阈值需要视研究区具体情况而定, 这取决于区域失稳斜坡的岩性特征、失稳机制、数据结果精度和监测对象变形速率, 已有研究多以所有输出相干像元的变形速率标准差作为阈值 (Wasowski 和

Bovenga, 2014)。本研究根据获得的斜坡方向地表变形监测结果、结果统计分析和野外变形斜坡考察等, 基于所有相干像元的形变速率标准差, 将 $-10 \sim 10 \text{ mm/a}$ 作为相对稳定阈值, 形变速率在此范围内的地区视为较稳定区。结合野外调查发现, 当变形速率大于 $\pm 20 \text{ mm/a}$ 时才会野外有明显的变形迹象, 通常会出现宽度不等的裂缝; 当年变形速率大于 $\pm 50 \text{ mm/a}$ 时, 坡脚发育鼓胀裂缝, 道路会出现不同程度的坍塌和失陷。本研究主要针对年变形速率(绝对值)大于 10 mm/a 的区域进行潜在滑坡的识别和验证, 圈定的潜在滑坡分布如图 5 所示。

4.2 潜在滑坡区圈定

基于以上的地表变形结果, 结合遥感解译和野外考察验证, 依据标准差, 以 $\pm 10 \text{ mm/a}$ 变形速率为阈值, 圈定干流区的潜在滑坡, 通过 GIS 中的空间分析手段得到 114 个变形速率绝对值大于 10 mm/a 的潜在滑坡点(图 5), 具体位置及变形特征见附表 1。潜在滑坡的面积从 0.003 km^2 到 5 km^2 不等, 总面积 25.91 km^2 。结合图 4 结果及野外实地考察发现, 上游段主要以高山峡谷地貌为主, 河

谷较窄河宽较小, 且以灰岩、砂质板岩等坚硬岩石为主, 灾害以坡面泥石流和风化破碎岩石的崩塌为主要的表现形式, 滑坡较少; 中下游段, 如舟曲县城和武都区等地, 受地形和断层活动影响, 变形主要以沿 LOS 方向的负向变形为主, 且速率较大, 潜在滑坡分布频率较高, 流域内的大型高位滑坡多发生于此区段内。下游的潜在滑坡主要以坡面浅层蠕滑为主, 面积较小, 发育成滑坡灾害的风险也较小。

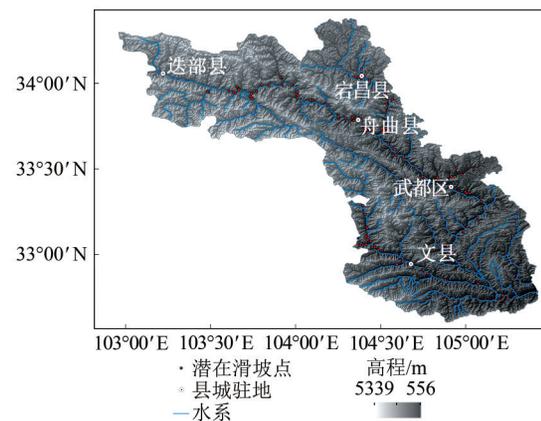


图 5 2018 年—2019 年白龙江流域潜在滑坡分布图
Fig. 5 Distribution of potential landslides in the Bailong River Basin from 2018 to 2019

附表 1 潜在滑坡点位及变形特征统计表

Schedule 1 Statistics table of potential landslide location and deformation characteristics

| 统一编号 | 野外名称 | 经度 | 纬度 | 变形特征 |
|------|--------|-----------------|----------------|-------------------------------------|
| 001 | 宕州公园 | 104°21'45.75" E | 34°1'51.39" N | 后壁陡坎、裂隙发育, 存在人为扰动 |
| 002 | 官鹅沟 | 104°23'8.99" E | 34°1'47.84" N | 圈椅状滑坡, 坡脚挡墙发育鼓胀裂缝, 坡体碎石土堆积, 风化严重 |
| 003 | 将台乡 | 104°23'7.85" E | 34°5'7.60" N | 主要物质为泥岩风化层, 坡体道路裂缝发育, 局部渗水, 有潜在堵江隐患 |
| 004 | 上袁3 | 104°32'16.27" E | 33°52'54.88" N | 后壁陡坎、裂隙发育, 存在人为扰动 |
| 005 | 滑石关村 | 104°32'34.19" E | 33°50'29.40" N | 堆积层滑坡, 沿节理面滑动, 表面风化破碎严重 |
| 006 | 角弓镇—隧道 | 104°35'17.31" E | 33°34'55.17" N | 后缘裂缝发育, 存在浅层小滑坡, 下有隧道, 危害程度较低 |
| 007 | 千家崖 | 104°24'50.32" E | 33°6'19.03" N | 坡体上发育拉张裂缝、剥坠落, 坡体表面风化严重 |
| 008 | 次拉山 | 104°6'0.69" E | 33°54'1.68" N | 坡面存在明显变形迹象, 坡体上发育拉张裂缝、剥坠落 |
| 009 | 阿赛村 | 103°44'58.33" E | 33°56'32.56" N | 基岩滑坡, 坡体存在剥、坠落, 陡坎发育, 如果滑动存在堵江危险 |
| 010 | 旺藏乡3 | 103°38'47.10" E | 33°56'32.30" N | 坡面变形速率较大, 坡体发育拉张裂缝、陡坎, 滑坡前缘存在剥坠落 |
| 011 | 压浪尼巴 | 103°39'17.23" E | 33°58'44.66" N | 以局部浅层滑坡为主, 坡上存在剥坠落 |
| 012 | 宕昌 | 104°21'12.21" E | 34°2'0.79" N | 坡体上发育拉张裂隙、陡坎, 以多级浅层滑动为主 |
| 013 | 甘江头村 | 104°34'12.76" E | 33°54'22.54" N | 堆积层浅层滑坡, 发育陡坎, 坡体表面存在变形迹象 |
| 014 | 锁儿头村 | 104°20'0.09" E | 33°46'48.25" N | 以崩塌落石为主, 基岩裸露, 风化严重, 坡体存在明显变形迹象 |
| 015 | 刘家湾 | 104°31'18.69" E | 33°43'27.64" N | 坡脚挡墙开裂, 岩体开裂、破碎严重, 坡体堆积有大量石块 |
| 016 | 街上村 | 104°30'29.51" E | 33°42'48.96" N | 位于活动构造破碎带, 岩土体强度降低, 坡体电线杆歪斜, 下有防护措施 |

续表

| 统一编号 | 野外名称 | 经度 | 纬度 | 变形特征 |
|------|--------|-----------------|----------------|--|
| 017 | 土轿子村 | 104°26'58.78" E | 33°42'59.82" N | 坡上发育陡坎、拉张裂缝,坡面侵蚀严重 |
| 018 | 门头坪滑坡 | 104°24'59.86" E | 33°43'37.17" N | 坡体上导流槽有局部开裂,电线杆歪斜,坡面侵蚀严重 |
| 019 | 南峪 | 104°24'58.70" E | 33°43'49.18" N | 无整体滑动迹象,以坡面局部浅层崩滑为主 |
| 020 | 虎家崖1 | 104°24'28.03" E | 33°44'23.80" N | 坡脚变形迹象明显,房屋墙体、地面均有开裂 |
| 021 | 虎家崖2 | 104°24'18.15" E | 33°44'18.87" N | 发育陡坎、拉张裂缝,坡面侵蚀严重 |
| 022 | 泄流坡 | 104°24'22.61" E | 33°44'56.21" N | 前缘变形迹象明显,坡脚发育鼓胀裂缝 |
| 023 | 峰迭新区 | 104°15'17.16" E | 33°47'31.36" N | 发育陡坎、拉张裂缝,坡面侵蚀严重,电线杆歪斜,已有防护格构工程 |
| 024 | 沙川村 | 104°19'6.18" E | 33°46'50.30" N | 坡面侵蚀沟槽,陡坎发育,局部基岩裸露,风化严重 |
| 025 | 大小湾 | 104°20'28.51" E | 33°46'53.88" N | 位于锁儿头滑坡西侧,坡脚、坡面侵蚀严重,电线杆歪斜,堆积体前缘发育次级小滑坡,并可见次级滑坡剪出口及剪切裂缝 |
| 026 | 锁儿头滑坡 | 104°20'4.40" E | 33°47'59.01" N | 坡脚房屋、墙体开裂,坡体电线杆歪斜,发育多级陡坎,变形速率相对较快 |
| 027 | 罗家峪滑坡 | 104°23'15.67" E | 33°46'55.97" N | 发育陡坎,可见坡体上次级小滑坡且后缘拉张裂缝发育。公路坍塌,防护栏损坏 |
| 028 | 谢家村1 | 104°30'58.76" E | 33°44'32.39" N | 坡体上电线杆歪斜,堆积有大量破碎岩石块,在有利条件下有发展为石流的可能 |
| 029 | 谢家村2 | 104°30'59.42" E | 33°44'24.35" N | 碎石土堆积,坡体上发育次级滑坡,后壁有拉张裂缝,且坡体渗水 |
| 030 | 中台滑坡 | 104°30'21.76" E | 33°44'9.25" N | 陡坎、拉张裂缝发育,侵蚀严重并发育局部崩滑 |
| 031 | 董家庄村 | 104°32'40.42" E | 33°38'42.05" N | 侵蚀严重,陡坎发育,岩石风化破碎严重,有堵江危险 |
| 032 | 下白杨村 | 104°44'46.50" E | 33°27'16.38" N | 裂缝、侵蚀沟槽发育 |
| 033 | 礼武公路 | 104°49'31.48" E | 33°26'2.88" N | 基岩风化破碎严重,发育崩塌,侵蚀沟槽和裂缝发育且在侧壁更为突出 |
| 034 | 礼武公路2 | 104°49'54.91" E | 33°27'4.32" N | 坡体发育侵蚀沟槽 |
| 035 | 黄家坝村 | 104°51'4.04" E | 33°24'21.39" N | 坡面沟道侵蚀,发育裂缝、陡坎,伴有多组多级滑动,发育崩塌落石, |
| 036 | 甘家沟村 | 105°0'25.70" E | 33°21'27.17" N | 基岩风化裸露,坡体上存在明显变形迹象 |
| 037 | 蔡家湾 | 105°1'20.47" E | 33°21'28.04" N | 黄土侵蚀严重,基岩风化裸露,坡体上变形明显 |
| 038 | 柑桔乡 | 105°5'30.50" E | 33°18'35.36" N | 发育陡坎、崩塌落石及侵蚀沟槽,伴有多级滑动,威胁下方道路 |
| 039 | 石坪村 | 104°54'55.78" E | 33°27'15.75" N | 坡体上变形迹象明显,坡体上的房屋墙体开裂严重 |
| 040 | 高桥村 | 104°56'15.63" E | 33°27'11.54" N | 坡脚沟道侵蚀引起的侧壁滑动,坡体上变形迹象严重 |
| 041 | 石楞坎村 | 104°56'41.25" E | 33°30'19.90" N | 岩石出露且风化严重,发育陡坎和裂缝 |
| 042 | 大李村 | 104°58'29.70" E | 33°28'5.54" N | 受流水侵蚀和人类工程影响,受降雨诱发,以沟道、道路的边坡滑动为主,伴有多组多级滑动 |
| 043 | 安化镇 | 105°2'48.79" E | 33°29'51.17" N | 坡体上侵蚀严重,边坡发育次级滑动 |
| 044 | 碧口 | 105°14'44.36" E | 32°44'42.21" N | 变形迹象明显 |
| 045 | 碧口水库 | 105°13'12.39" E | 32°45'44.82" N | 变形破坏迹象为建筑变形,滑体倾倒开裂 |
| 046 | 尹家坝村 | 104°46'31.87" E | 32°53'22.19" N | 坡体发育拉张裂缝、陡坎,沟道两侧存在剥坠落,局部发生浅层滑坡。 |
| 047 | 尚德镇 | 104°45'1.38" E | 32°54'32.25" N | 坡体发育拉张裂缝、陡坎,局部崩滑 |
| 048 | 文州路韩家沟 | 104°41'3.47" E | 32°56'17.91" N | 坡体发育拉张裂缝,并有浅层滑动 |
| 049 | 刘家咀村 | 104°37'49.57" E | 32°57'23.74" N | 坡体发育拉张裂缝,坡上存在剥坠落 |
| 050 | 景家坝村 | 104°35'46.93" E | 32°56'35.36" N | 坡体发育拉张裂缝、陡坎,滑坡后壁可见 |
| 051 | 边地坪村 | 104°22'45.22" E | 33°3'18.95" N | 坡体发育拉张裂缝、陡坎,坡上存在剥坠落 |
| 052 | 宛坪 | 104°23'42.27" E | 33°3'15.39" N | 坡体发育拉张裂缝、坡上存在剥坠落 |
| 053 | 哈南村 | 104°24'54.08" E | 33°3'29.88" N | 滑坡边界明显,后缘裂缝在影像上表现明显 |
| 054 | 黄土地村 | 104°23'51.39" E | 33°17'8.54" N | 沿沟道可看到清晰的3个滑坡,圈椅形态明显,后缘基岩存在崩塌坠落,影像表现较为破碎。 |
| 055 | 兴隆村 | 104°24'30.72" E | 33°14'8.03" N | 前缘破碎,后缘可见拉张裂缝,圈椅状 |

续表

| 统一编号 | 野外名称 | 经度 | 纬度 | 变形特征 |
|------|---------|-----------------|----------------|---|
| 056 | 花庄坝 | 104°25'0.80" E | 33°9'40.13" N | 表面植被覆盖破碎 |
| 057 | 梨树坝村 | 104°25'17.37" E | 33°9'12.42" N | 构造运动引起,坡面较陡,发育崩塌落石 |
| 058 | 阴平寨村 | 104°25'38.21" E | 33°5'49.10" N | 沟道两侧发育有两个相向的滑坡,基岩破碎、颜色易辨,可见拉张裂缝 |
| 059 | 种树坪村 | 104°25'28.55" E | 33°5'6.86" N | 老滑坡体,面积规模大,表面破碎不完整,明显区别于周围 |
| 060 | 种树坪村2 | 104°26'36.08" E | 33°4'41.56" N | 圈椅状滑坡,上陡下缓,基岩局部裸露,且有局部崩滑 |
| 061 | 下坝 | 104°26'59.42" E | 33°2'31.30" N | 变形点所在位置发育有两个滑坡,坡向不同,但皆有基岩的崩落及拉张裂缝 |
| 062 | 下坝2 | 104°27'54.79" E | 33°2'37.31" N | 老滑坡体,中下部变形速率较快,后缘裂缝发育,基岩破碎裸露 |
| 063 | 木元村 | 104°53'51.32" E | 33°0'13.68" N | 坡脚变形迹象明显 |
| 064 | 河口村 | 104°53'27.04" E | 33°2'41.29" N | 有局部崩滑,裂缝发育 |
| 065 | 棉花地 | 104°53'39.63" E | 33°2'51.94" N | 有局部崩滑,裂缝发育 |
| 066 | 庙儿沟 | 104°59'15.82" E | 33°8'15.71" N | 中部破碎严重,发育崩塌 |
| 067 | 稻畦子村 | 105°0'34.54" E | 33°9'41.30" N | 老滑坡,裂缝发育,后壁基岩裸露 |
| 068 | 宗家坝村 | 105°4'9.57" E | 33°12'53.33" N | 以中上部变形为主,表面破碎,坡体发育拉张裂缝、陡坎、侵蚀沟道,存在剥坠落、树木歪斜 |
| 069 | 角弓镇 | 104°37'52.68" E | 33°33'57.94" N | 前缘变形迹象明显,发育拉张裂缝 |
| 070 | 杭嘎村 | 104°11'19.74" E | 33°52'28.61" N | 表面可见多条纵向裂缝,,右侧更为明显 |
| 071 | 花年村 | 104°5'8.54" E | 33°53'59.96" N | 上部较为破碎,变形严重,以此有别于周围影像特征 |
| 072 | 岭儿坝 | 104°0'39.11" E | 33°54'58.99" N | 植被覆盖破碎,后缘边界明显,坡体发育拉张裂缝、剥坠落,抗滑挡墙开裂 |
| 073 | 曲瓦乡 | 104°0'42.80" E | 33°55'48.07" N | 舌状滑坡,下部破碎,基岩存在崩塌坠落 |
| 074 | 各峪水地 | 104°0'22.17" E | 33°56'40.29" N | 形态不规则,沿沟道边界明显,表面破碎 |
| 075 | 各峪 | 104°0'40.02" E | 33°57'8.88" N | 下部变形明显,表面破碎,局部基岩破碎裸露,坡体发育拉张裂缝、陡坎、侵蚀沟槽,存在剥坠落 |
| 076 | 洛大乡 | 103°58'40.94" E | 33°59'27.96" N | 沿沟道边界明显可见,坡面侵蚀严重,沟槽发育 |
| 077 | 采古 | 103°54'54.16" E | 34°1'55.23" N | 坡体发育拉张裂缝,坡面存在变形迹象,存在剥坠落、树木歪斜、建筑变形、墙体开裂现象 |
| 078 | 采古2 | 103°54'50.34" E | 34°2'6.54" N | 土地裸露,坡体发育侵蚀沟槽,坡上引流槽开裂,坡上存在变形迹象 |
| 079 | 洛大乡2 | 103°55'22.88" E | 33°59'14.47" N | 坡体存在剥坠落、树木歪斜现象,坡体上存在变形点 |
| 080 | 西布谷桑巴贡玛 | 103°50'40.96" E | 33°59'7.41" N | 降水引起坡面风化物质的剥坠落堆积,有发展为浅层滑坡的趋势 |
| 081 | 其尔果达 | 103°47'58.84" E | 33°59'25.02" N | 基岩裸露,坡体发育拉张裂缝,存在剥坠落,滑坡前缘存在明显变形迹象 |
| 082 | 格益那 | 103°46'10.34" E | 33°57'7.18" N | 基岩裸露,存在剥坠落、侵蚀沟槽,坡体存在变形迹象 |
| 083 | 阿赛村2 | 103°44'18.88" E | 33°56'13.79" N | 基岩裸露,坡体发育拉张裂缝,存在剥坠落,侧方基岩裸露 |
| 084 | 旺藏乡 | 103°36'28.40" E | 33°57'13.33" N | 土地裸露,坡体发育陡坎、存在剥坠落,局部坡面浅层滑坡 |
| 085 | 卡坝1 | 103°29'14.75" E | 33°56'55.09" N | 土地裸露,坡体存在剥坠落、树木歪斜现象,可能发育为坡积层滑坡 |
| 086 | 旺藏乡2 | 103°38'0.39" E | 33°56'46.37" N | 基岩裸露,坡面受侵蚀,局部存在剥坠落,坡体上存在明显变形迹象 |
| 087 | 压浪尼巴2 | 103°39'47.70" E | 33°58'16.64" N | 土地裸露,坡体发育拉张裂缝,存在地面沉降、剥坠落、树木电线杆歪斜现象,公路裂缝发育,沿路坡体物质风化破碎,偶有崩塌坠落掩埋公路 |
| 088 | 压浪尼巴3 | 103°39'55.97" E | 33°58'1.10" N | 土地裸露,坡面发育侵蚀沟槽,坡体表面存在变形特征 |
| 089 | 压浪尼巴4 | 103°39'58.89" E | 33°57'34.13" N | 土地裸露,坡面发育侵蚀沟槽,坡体表面存在变形特征 |
| 090 | 班藏村 | 103°44'46.83" E | 33°54'32.59" N | 基岩裸露,坡体发育拉张裂缝、陡坎,存在树木、电线杆歪斜现象,顶部崩塌严重 |
| 091 | 班藏村2 | 103°44'19.17" E | 33°54'53.18" N | 基岩裸露,坡体发育拉张裂缝、陡坎,存在树木、电线杆歪斜现象,顶部崩塌严重 |
| 092 | 班藏村3 | 103°43'53.07" E | 33°55'31.76" N | 基岩裸露,坡体发育拉张裂缝、陡坎,存在树木、电线杆歪斜现象,顶部崩塌严重 |

续表

| 统一编号 | 野外名称 | 经度 | 纬度 | 变形特征 |
|------|-----------|-----------------|----------------|--|
| 093 | 财政局 | 104°24'5.20" E | 34°2'32.85" N | 坡面侵蚀严重,伴有浅层局部崩塌,房屋墙体发育裂缝,降雨水位上涨对土墙影响较大,有发展成滑坡的趋势 |
| 094 | 玉地河村 | 104°26'2.10" E | 34°1'0.79" N | 房屋、建筑墙体开裂严重 |
| 095 | 上袁2 | 104°31'59.89" E | 33°52'50.44" N | 构造运动引起,坡面较陡,发育崩塌落石 |
| 096 | 大湾沟 | 104°35'2.03" E | 33°36'45.78" N | 岩石破碎,坡体侵蚀严重且有渗水,陡坎发育,侵蚀严重 |
| 097 | 石坡山 | 104°52'23.57" E | 33°24'42.77" N | 受降水影响,坡面沟道侵蚀严重,裂缝发育 |
| 098 | 燕儿沟 | 104°59'57.75" E | 33°21'58.40" N | 裂缝、陡坎发育,侵蚀严重,岩石风化破碎严重,为泥石流提供物源 |
| 099 | 井地里 | 105°4'27.99" E | 32°49'47.51" N | 坡体发育拉张裂缝、陡坎,为泥石流提供物源 |
| 100 | 县一中 | 104°22'6.19" E | 34°2'5.82" N | 受人为扰动严重,以浅层蠕动为主,无整体滑动迹象,危及房屋但程度较轻 |
| 101 | 董家里 | 104°23'8.99" E | 34°3'12.91" N | 坡面存在变形迹象,发育拉张裂缝,为开挖坡脚所致 |
| 102 | 甘江头 | 104°31'41.69" E | 33°56'7.66" N | 坡体上有泥石流导流槽,是侵蚀引起的局部崩塌,有发育成浅层滑坡的趋势 |
| 103 | 新农村—212国道 | 104°32'1.80" E | 33°54'58.10" N | 公路边坡,基岩风化壳,风化破碎严重,有崩滑的可能 |
| 104 | 黄家 | 104°33'47.49" E | 33°54'11.92" N | 人工边坡,裸地,发育局部崩滑 |
| 105 | 上袁1 | 104°32'22.37" E | 33°52'53.98" N | 拉张裂缝;中部变形较明显 |
| 106 | 御兰酒店 | 104°15'2.25" E | 33°48'19.30" N | 发育陡坎,树木歪斜,风化壳和第四纪物质破碎,局部发育崩滑 |
| 107 | 青峰集团 | 104°15'17.49" E | 33°47'54.98" N | 坡脚发育局部浅层崩滑,存在明显变形迹象 |
| 108 | 狼岔坝村 | 104°17'45.60" E | 33°47'41.80" N | 陡坎、拉张裂缝,坡面发育多条侵蚀沟槽,沟道两侧发育局部浅层崩滑 |
| 109 | 瓦窑坡 | 104°52'50.52" E | 32°51'7.13" N | 以崩塌落石为主,坡体发育拉张裂缝 |
| 110 | 马尾墩 | 104°22'0.19" E | 33°4'17.00" N | 建有采石场,坡体存在剥坠落 |
| 111 | 卡坝2 | 103°28'50.77" E | 33°57'10.43" N | 基岩部分出露,风化严重,主要发育崩塌落石 |
| 112 | 新农村2 | 104°32'32.35" E | 33°54'54.34" N | 坡面侵蚀严重,发育陡坎、拉张裂缝 |
| 113 | 化马 | 104°31'58.39" E | 33°44'12.88" N | 断裂带大型滑坡,坡面侵蚀严重,前缘挡墙开裂,发育极多浅层小滑坡 |
| 114 | 郭家坡 | 104°29'12.63" E | 33°1'42.07" N | 坡脚变形迹象明显 |

4.3 典型潜在滑坡变形特征

如图6为本次研究中命名为杭嘎村的一处潜在滑坡,位置位于分区4的范围内,经度104°11'19.74"E,纬度33°52'28.61"N,平均坡度33.31°,坡向222.81°,高差达500m,面积 $1.96 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。图6(a)为此处的变形监测结果,年变形速率最大达50mm/a,位于坡体中部偏下的位置。野外考察发现,此处确实存在与监测结果相符的变形,主要表现为图6(b)所示的裂缝和呈连续串珠状发育的落水洞,宽度5—50cm不等,深度最大可达2m。

图7为舟曲县罗家峪村附近的一处潜在滑坡,经度104°23'15.67"E,纬度33°46'55.97"N,平均坡度19.16°,坡向284.16°,面积 $28.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,平面形态不规则。变形在整个坡体均有分布,速率较大的分布在中上部,最大达到53mm/a。野外调查

发现坡体上部分树木和电线杆歪斜,裂缝发育,严重的变形使得路基塌陷、路面损毁,与监测的结果相吻合。野外验证的其他潜在滑坡与InSAR结果均有很高的一致性。基于野外的勘测和数据采集,进一步对研究区的潜在滑坡进行了发育及分布特征的统计分析。

4.4 潜在滑坡的发育及分布特征

基于上述数据结果,结合遥感解译,利用区域DEM数据提取出研究区的坡度、坡向图,进而利用统计分析工具,得到114处潜在滑坡的平均坡度、平均坡向、面积等数据,对其发育、分布特征进行统计分析。

(1) 地形。坡度、坡向、相对高差等地形地貌因子对滑坡的分布有着很大影响,合适的坡度、坡向及相对高差可以为滑坡的发育和形成提供有利的势能和物质积累(庞茂康,2011)。

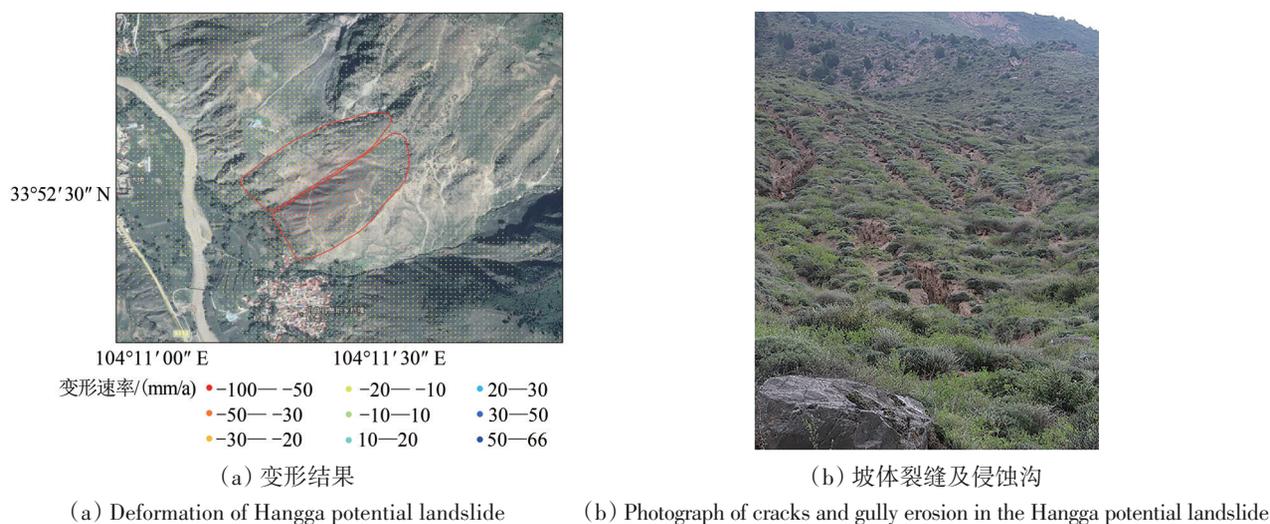


图6 杭嘎村潜在滑坡变形结果及野外验证照片

Fig. 6 Deformation and photographs of Hangga potential landslide

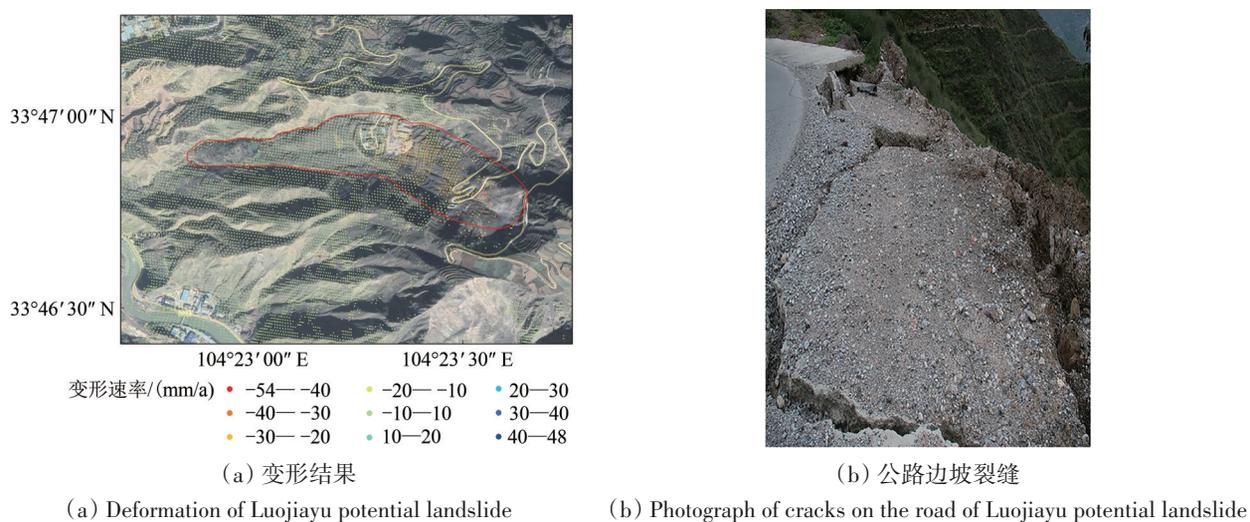


图7 罗家峪潜在滑坡变形结果及野外验证照片

Fig. 7 Deformation and photographs of Luojiayu potential landslide

坡度严重影响着斜坡的植被覆盖、含水量、堆积物的覆盖程度等，是滑坡发育及斜坡稳定性的重要影响因素之一。结合前人对坡度的划分经验（樊晓一和乔建平，2004），将坡度划分为6个区段，如图8（a）所示，结果表示潜在滑坡主要分布在坡度小于 40° 的自然斜坡上，其中以 20° — 40° 最为集中，占总数的83.3%。这是由于该区的自然斜坡多由基岩组成，斜坡坡度较小不足以达到其临空条件，过大时灾害更多以崩塌的形式发育。

同时，依据坡向的划分（王朝阳和陈吉普，2007）及潜在滑坡所处位置，研究发现潜在滑坡主要集中于东南向、南向以及西南向（坡向范围

135° — 270° ）的阳坡上，结果如图8（b）、图8（d）。这是由阴阳坡不同的降水、基岩风化程度、植被覆盖、人类活动等因素决定的。白龙江流域的降水主要集中在7、8月份，在此时间段内，阳坡作为迎风坡，降雨比阴坡高出许多；且阳坡昼夜温差大、岩土体受温度变化的影响，风化破碎更加严重；研究发现（Cerdà，1996），阴坡的植被覆盖率远高于阳坡，而植物根系对土壤的加固作用已被证实，这使得阳坡岩土体的稳定性较差；另外，野外调查发现，住房和耕地等主要分布于阳坡，人类活动破坏了坡体的稳定性。这些因素均使得阳坡更易发育滑坡，使得潜在滑坡大多集中于阳坡。

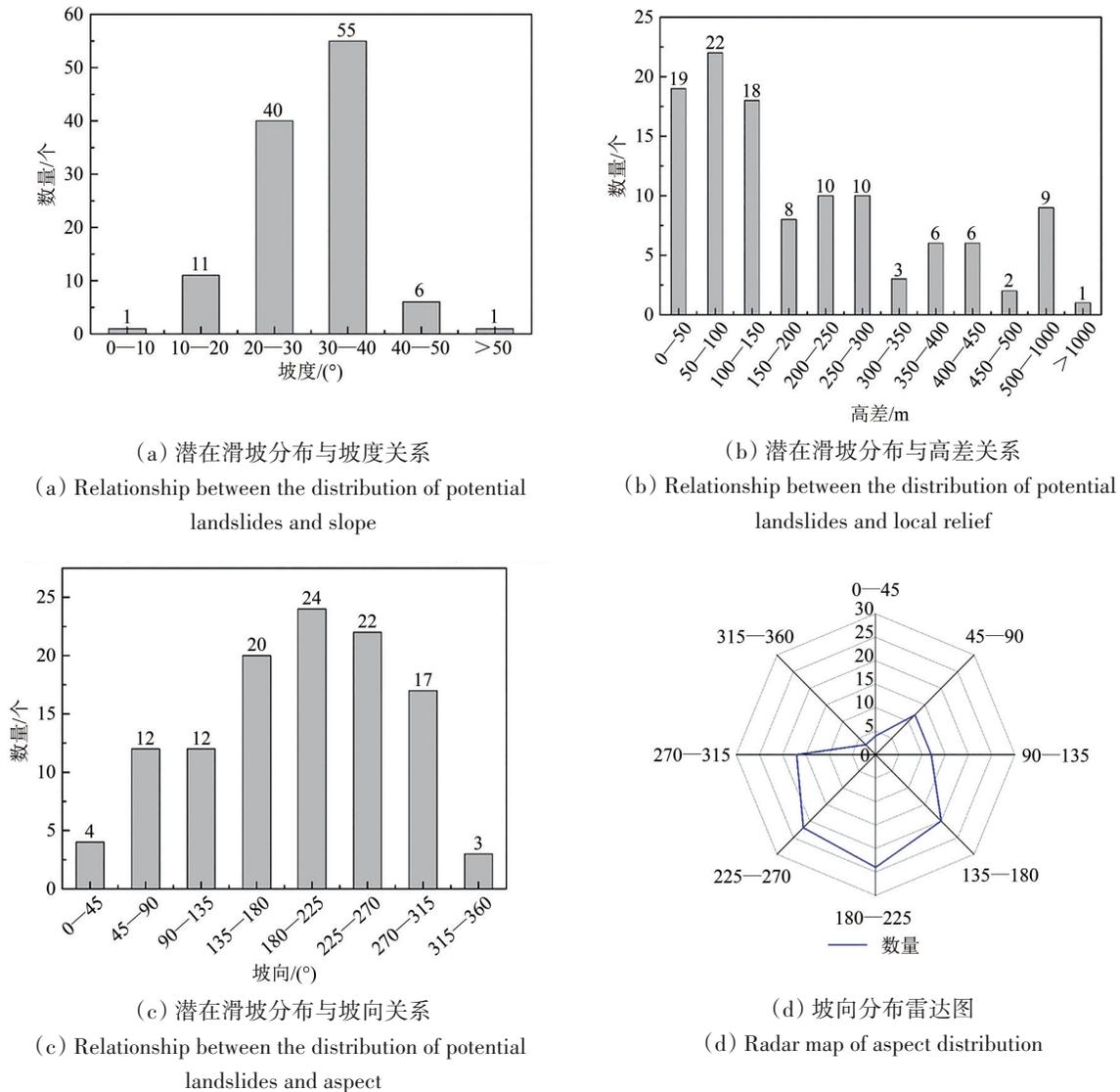


图8 潜在滑坡分布与坡度、坡向、高差关系

Fig.8 Relationship between the distribution of potential landslides and slope, aspect and local relief, respectively

如图8(c)统计分析结果显示,潜在滑坡所在的坡体单元的相对高差多集中在0—150 m的范围内,此段高差为滑坡的发育提供了有利条件,占总数的51.8%。其中分布最多的范围为50—100 m,占到了总数的19.3%。最大的相对高差达到了1000 m以上,但其整体坡度较缓且变形速率小于10 mm/a,并以局部浅层崩滑为主。

(2) 岩性与构造。由图9可见,白龙江流域主要分布有千枚岩、砂岩、砂泥岩混层及部分第四纪堆积物等物质,将潜在滑坡的分布与其进行叠加分析统计,得到结果如图10所示,本区的潜在滑坡大都发育于志留纪的千枚岩、砂质板岩和三叠、侏罗纪的砂泥岩、页岩等风化破碎严重、质

地较为脆弱的软弱地层中,占到了滑坡隐患总数的60%以上。特殊的岩石性质给滑坡的发育提供了有利条件,在降雨、地震等外界因素的诱发下,极易发生滑坡灾害。另一方面,经统计分析,114处滑坡隐患中,到断层的距离大于5 km的隐患只有21处,有82%的潜在滑坡的发育受控于断层等地质构造。

(3) 面积发育。对114处潜在滑坡的面积进行统计,结果显示(图11),潜在滑坡面积主要集中于小于 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的范围内。说明区内滑坡主要以中小型、浅层滑坡为主,大型、巨型滑坡较少,但灾害风险较大,如锁儿头滑坡、化马滑坡等,且多受断层等构造活动的影响。

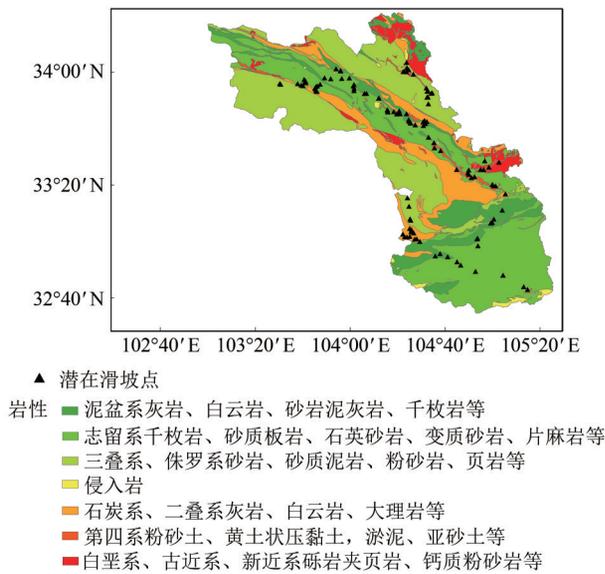
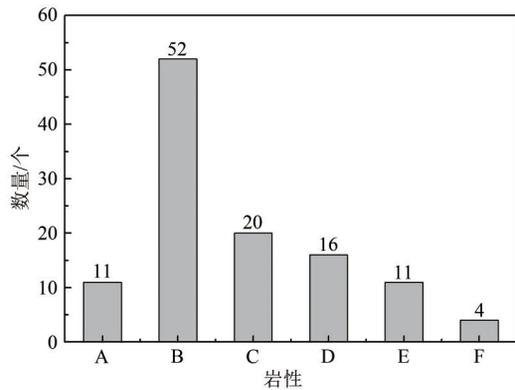


图9 白龙江流域潜在滑坡地层岩性图

Fig. 9 Lithology of potential landslides in the Bailong River Basin



- A 泥盆系灰岩、白云岩、砂岩泥灰岩、炭质板岩(含煤层)、千枚岩
- B 志留系千枚岩、砂质板岩、石英砂岩、变质砂岩、片麻岩、夹安山凝灰岩、凝灰砂岩
- C 三叠系、侏罗系砂岩、砂质泥岩、粉砂岩、页岩及砾岩夹泥灰岩
- D 石炭系、二叠系灰岩、白云岩、大理岩，局部夹杂岩、千枚岩、板岩、炭质千枚岩、板岩、页岩、砂岩及灰岩
- E 第四系粉砂土、黄土状压黏土，淤泥、亚砂土，少有夹砾石和碎石块、沙砾层
- F 白垩系、古近系、新近系砾岩夹页岩、钙质粉砂岩、砂砾岩、泥岩、砂质黏土

图10 潜在滑坡分布与岩性关系

Fig. 10 Relationship between the distribution of potential landslides and lithology

5 牙豁口滑坡

2019-07-19 T 6:00 pm, 甘肃省舟曲县东山镇下庄村牙豁口发生高位山体滑坡(图12), 滑坡整体呈长条状, 相对高差 560 m, 长度约 2000 m, 平均坡度 16°。坡体一直沿坡向下滑动直至进入岷江, 毁坏了位于坡体上的道路和部分耕地, 入江的物质使得水位上涨, 严重威胁周围

居民的生命、财产安全。本研究基于滑坡发生前的地表变形监测结果, 结合遥感影像和野外验证, 对牙豁口滑坡滑前的地表变形特征和运动模式进行分析。

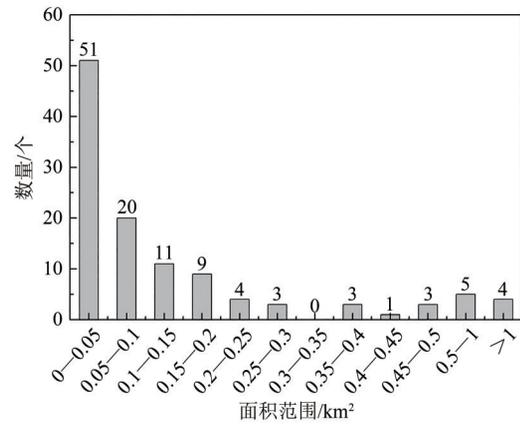


图11 潜在滑坡面积发育分布情况

Fig. 11 Area distribution of potential landslides

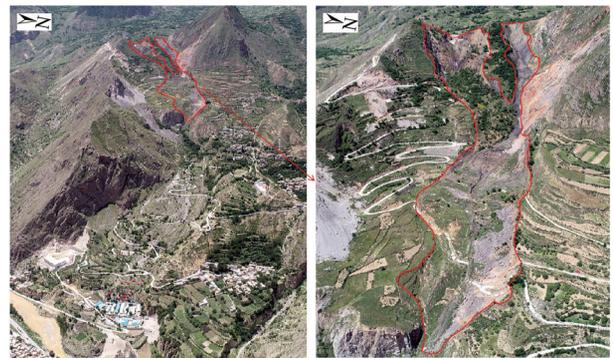


图12 牙豁口滑坡2019-07-20无人机影像

Fig. 12 Photographs of Yahuokou landslide taken by drone on July 20, 2019

5.1 滑前地表变形特征

牙豁口滑坡处于坪定—化马断裂带上, 出露的岩层风化破碎严重, 7月进入雨季, 坡体在频繁降雨的影响下趋于饱和, 由于中后部有大量碎石土堆积, 载荷较大, 加之雨季降水破坏了坡体的稳定, 使中—后缘快速破坏变形最终失稳发生滑动, 并对前缘坡体造成强大的挤压, 形成滑坡灾害。结合前期的InSAR监测结果和遥感影像, 对此滑坡进行以下两方面的研究。

(1) 地表变形监测结果。牙豁口滑坡2018-03—2019-03的地表变形监测结果如图13(a)所示, 底图为2019-01获取的谷歌遥感影像。可看出, 在7月的滑坡事件发生前, 整个斜坡中部和后部已监测到较大区域的形变, 且变形速率较大,

雷达视线向变形速率可达 38 mm/a。前缘在发生前的监测时间内未发生明显变形。图 13 (a) 中黑色多边形范围也出现了速率较大的变形, 方向沿雷达视线向靠近雷达, 表现为浅层次级滑动及基岩崩

塌坠落, 调查时发现路基坍塌、边坡失稳发生次级滑动, 同时为滑坡的发生提供了部分物质来源。此结果与实际情况吻合度较高, 证实 InSAR 技术可在区域尺度上进行地表变形监测有效性和可靠性。

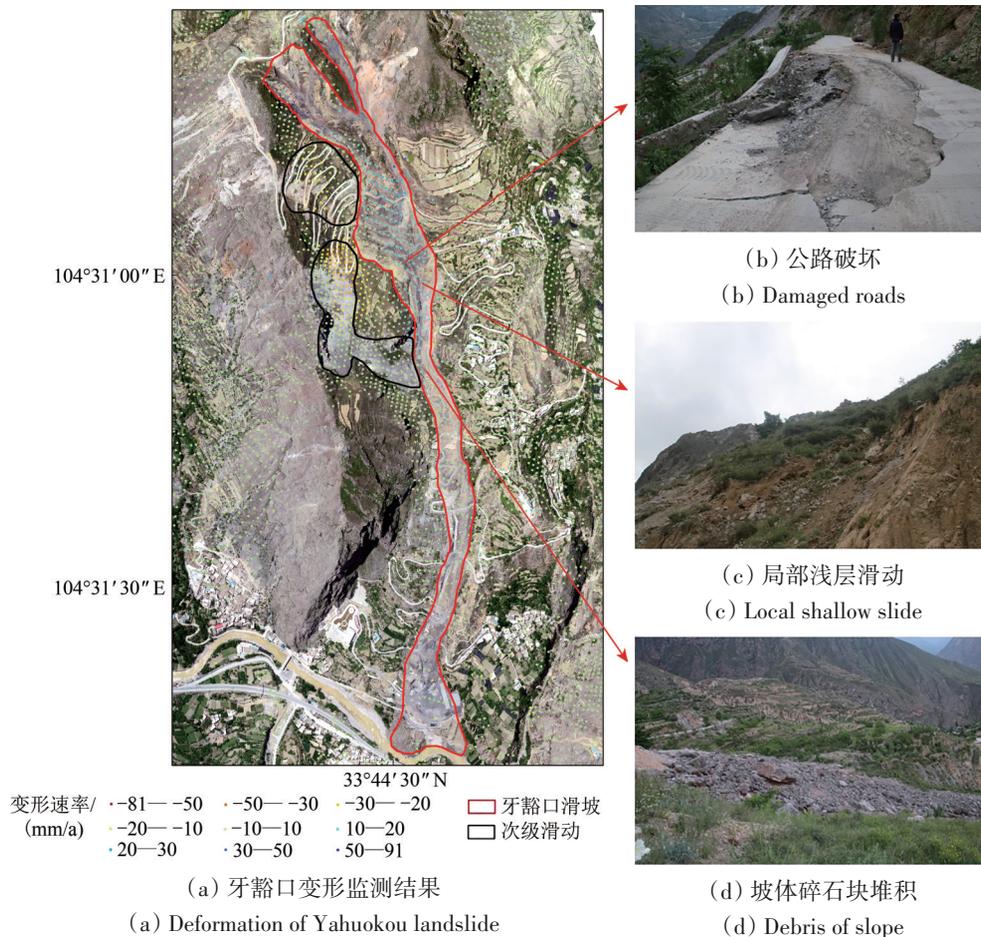


图 13 牙豁口滑坡变形结果及野外照片

Fig. 13 Deformation and photographs of Yahuokou landslide

(2) 滑坡前期变形特征。2019-06—2019-07 的两次野外验证工作, 准确的验证了上述结果, 野外编号为谢家村的两处潜在滑坡即是本次滑坡灾害的发生点, 野外验证结果如图 13 (b)、图 13 (c) 和图 13 (d)。图 13 (b) 为 414 县道局部段因路基下部坡体发生位移而失稳, 坍塌和裂缝发育但仍可通车, 滑坡发生后此处道路百余米已被滑坡体掩埋。图 13 (c) 为斜坡上发育的某处小型的局部浅层滑动, 植被破坏、岩土体破碎严重。图 13 (d) 为在斜坡上发现的大量粒径大小不一的基岩碎石块, 小至 2—3 cm, 大至 50 cm。

5.2 滑坡运动分区

此斜坡的滑动是由老滑坡的局部复活引起,

而诱因主要是降水, 整体存在滑动但各部分运动机制和表现状态不一。根据影像判读和现场勘测, 结合地表变形结果, 将牙豁口滑坡分成: 物质搬运区、物质流通区、物质堆积区 (图 14)。图示照片为 2019-09 拍摄, 坡体上的部分堆积体已被清理。

(1) 后缘物质搬运区。此区域整体形态上窄下宽, 长度约 750 m, 最宽处约 90 m, 最宽处约 187 m, 后部较前部陡, 是破坏最为严重的部分。植被破坏严重, 树木、电线杆歪斜, 公路塌陷, 裂缝发育, 部分农田受到影响, 滑坡堆积物持续处于活动状态, 07-20 实地考察时局部碎石土仍在滑落。据滑坡发生前的调查发现, 中部已堆积有

一定规模的基岩碎石块, 滑坡发生后, 这些物质再次与其他滑体物质相互混杂发生滑动。两侧坡度相对陡峭, 后缘裂隙、陡坎发育, 坡脚有滑体堆积, 第四纪堆积物较少, 主要以风化破碎的基岩碎块为主。



图14 牙豁口滑坡分区

Fig. 14 Motion divisions of Yahuokou landslide

(2) 中部物质流通区。此区域为滑体的搬运和流通提供了路径, 形态为窄长的条状, 长度约915 m, 最窄处60 m。滑体沿滑床发生顺坡滑动, 滑动方向受地形影响有所改变, 破坏了途径的道路和部分呈阶梯式分布的农田。且此区域相对高差292 m, 平均坡度为 18° , 较其他区域更陡, 为物质的流通提供条件。

(3) 前缘堆积区。前缘堆积区主要发生鼓胀变形, 形态呈扇状, 长度约347 m。滑体不断向前滑动, 坡体受到来自中后缘超过坡体承压范围的挤压应力, 逐渐向下推移, 最终堆积在沿岸, 甚至有堆积体滑入岷江数米, 造成了水位的上涨。

6 结论

本研究基于InSAR方法对白龙江流域的潜在滑坡进行了早期识别、野外验证和发育、分布特征研究, 对牙豁口滑坡的滑前地表变形特征和运动模式进行了分析, 得出以下结论:

(1) 研究区2018-03—2019-03 LOS向的形变范围在 $-158 \sim 110$ mm/a。以变形速率10 mm/a为阈值, 圈定得到114处潜在滑坡点, 并进行野外验证, 对杭嘎村等处的潜在滑坡进行分析并很好的证实了InSAR技术在区域地表变形监测上的有效性和准确性。

(2) 对114处潜在滑坡的坡度、坡向、高差、岩性、是否受构造活动控制以及面积进行统计, 分析得到白龙江流域的潜在滑坡主要分布在坡度 $20^\circ \sim 40^\circ$ 、坡向 $135^\circ \sim 270^\circ$, 高差小于150 m的千枚岩等软弱岩层中, 面积发育大多小于 5×10^4 m², 且超过80%的潜在滑坡均不同程度的受到了断层等构造活动的影响。

(3) 2019-07发生的牙豁口滑坡, 是一处由降雨引起的推移式大型高位山体滑坡, 在滑坡发生前已监测和调查到明显形变信息, 如大量碎石块堆积、道路塌陷、坡体上局部浅层滑动等, 验证了InSAR变形监测在区域潜在滑坡识别的有效性。通过遥感解译、地形地貌分析和野外考察将整个滑坡分为搬运区、流通区和堆积区。

参考文献(References)

- 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]
- Cerdà A. 1996. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, 69(3/4): 217-232 [DOI: 10.1016/0016-7061(95)00062-3]
- Chen M. 2017. Research on development characteristics and formation mechanism of large-scale landslides in Bailongjiang River Basin. Chengdu: Chengdu University of Technology (陈明. 2017. 白龙江流域大型滑坡发育特征及成因机制研究. 成都: 成都理工大学)
- Du G L, Zhang Y S, Gao J C, Sun Y C and Guo C B. 2016. Landslide susceptibility assessment based on GIS in Bailongjiang watershed, Gansu Province. *Journal of Geomechanics*, 22(1): 1-11 (杜国梁, 张永双, 高金川, 孙於春, 郭长宝. 2016. 基于GIS的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价. *地质力学学报*, 22(1): 1-11 [DOI: 10.3969/j.issn.1006-6616.2016.01.001])
- Fan X Y and Qiao J P. 2004. Topography discriminance of the assessment of Landslide Hazard Degree. *Journal of Mountain Science*, 22(6): 730-734 (樊晓一, 乔建平. 2004. 滑坡危险度评价的地形判别法. *山地学报*, 22(6): 730-734 [DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2004.06.016])

- Guo C B, Ren S S, Li X, Zhang Y S, Yang Z H, Wu R A and Jin J J. 2019. Development characteristics and reactivation mechanism of the Jiangdingya ancient landslide in the Nanyu Town, Zhouqu County, Gansu Province. *Geoscience*, 33(1): 206-217 (郭长宝, 任三绍, 李雪, 张永双, 杨志华, 吴瑞安, 金继军. 2019. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理. *现代地质*, 33(1): 206-217) [DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2019.01.20]
- Guo H D and Zhang L. 2019. 60 years of radar remote sensing: Four-stage development. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1023-1035 (郭华东, 张露. 2019. 雷达遥感六十年: 四个阶段的发展. *遥感学报*, 23(6): 1023-1035) [DOI: 10.11834/jrs.20199398]
- Guzzetti F, Manunta M, Ardizzone F, Pepe A, Cardinali M, Zeni G, Reichenbach P and Lanari R. 2009. Analysis of ground deformation detected using the SBAS-DInSAR technique in Umbria, Central Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 166(8/9): 1425-1459 [DOI: 10.1007/s00024-009-0491-4]
- Haque U, Da Silva P F, Devoli G, Pilz J, Zhao B X, Khaloua A, Wilopo W, Andersen P, Lu P, Lee J, Yamamoto T, Keeling D, Wu J H and Glass G E. 2019. The human cost of global warming: deadly landslides and their triggers (1995-2014). *Science of the Total Environment*, 682: 673-684 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.415]
- Jiang S, Wen B P, Li Z H and Zhao C. 2016. An analysis of the activity features of the Suertou landslide in Zhouqu county of Gansu. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 43(2): 69-74, 92 (蒋树, 文宝萍, 黎志恒, 赵成. 2016. 甘肃舟曲锁儿头滑坡活动特征分析. *水文地质工程地质*, 43(2): 69-74, 92) [DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.02.10]
- Jiang X Z, Wen B P, Jiang S, Feng C H, Zhao C and Li R D. 2015. Main factors analysis for controlling kinematic behavior of Suertou landslide. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(6): 1798-1807 (蒋秀姿, 文宝萍, 蒋树, 冯传煌, 赵成, 李瑞冬. 2015. 甘肃舟曲锁儿头滑坡活动的主控因素分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(6): 1798-1807) [DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201506203]
- Lee C H, Lin S H, Kao C L, Hong M Y, Huang P C, Shih C L and Chuang C C. 2020. Impact of climate change on disaster events in metropolitan cities-trend of disasters reported by Taiwan national medical response and preparedness system. *Environmental Research*, 183: 109186 [DOI: 10.1016/j.envres.2020.109186]
- Li S Z, Dai S, Wang H W and Zhang X. 2015. Fault features and their implications on distribution and formation of landslides in Bailongjiang Region. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 51(2): 145-152 (李淑贞, 戴霜, 王华伟, 张翔. 2015. 白龙江地区断裂构造与滑坡分布及发生关系. *兰州大学学报(自然科学版)*, 51(2): 145-152) [DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059. 2015. 02.001]
- Meng X M, Chen G, Guo P, Xiong M Q and Wasowski J. 2013. Research of landslides and debris flows in Bailong River Basin: progress and prospect. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 33(4): 1-15 (孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 熊木齐, Wasowski J. 2013. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望. *海洋地质与第四纪地质*, 33(4): 1-15) [DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.04001]
- Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, Deng J F, Feng Y M, Zhang K X, Zhang Z Y, Wang F G, Xing G F, Hao G J and Feng Y F. 2009. Subdivision of tectonic units in China. *Geology in China*, 36(1): 1-28 (潘桂堂, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. *中国地质*, 36(1): 1-28) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2009.01.001]
- Pang M K. 2011. Study on the Developing Characteristics and Genesis Geological Environmental Conditions of Landslides in the Bailongjiang River Basin. Chengdu: Chengdu University of Technology (庞茂康. 2011. 白龙江流域滑坡发育特征及其成因的地质环境条件研究. 成都: 成都理工大学)
- Schmidt D A, 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]
- Tang X K. 2014. Fractal Features of Landslides in the Area Southern Gansu Province in the Bailongjiang River Basin. Lanzhou: Lanzhou University (唐新凯. 2014. 白龙江流域甘肃段滑坡灾害分形特征. 兰州: 兰州大学)
- Wang C Y and Chen J P. 2007. Study on the relationship between aspect and slope stability. *Technological Development of Enterprise*, 26(12): 12-14, 20 (王朝阳, 陈吉普. 2007. 坡向与斜坡稳定性的关系研究. *企业技术开发*, 26(12): 12-14, 20) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8937-B.2007.12.004]
- Wang T and Liao M S. 2018. Coseismic displacement derived from Sentinel-1 data: latest techniques and case studies. *Journal of Remote Sensing*, 22(S1): 120-127 (王腾, 廖明生. 2018. Sentinel-1 卫星数据提取同震形变场: 最新技术及震例. *遥感学报*, 22(增刊): 120-127) [DOI: 10.11834/jrs.20187480]
- Wasowski J and Bovenga F. 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174: 103-138 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003]
- Xiao L, He Y G, Xing X M, Wen D B, Tong C G, Chen L F and Yu X Y. 2019. Time series subsidence analysis of drilling solution mining salt mines based on Sentinel-1 data and SBAS-InSAR technique. *Journal of Remote Sensing*, 23(3): 501-513 (肖亮, 贺跃光, 邢学敏, 闻德保, 童成功, 陈立福, 俞晓莹. 2019. Sentinel-1 和 SBAS-InSAR 分析钻井水溶岩盐矿山时序沉降. *遥感学报*, 23(3): 501-513) [DOI: 10.11834/jrs.20198292]
- Yang W M, Huang X, Zhang C S and Si H B. 2014. Deformation behavior of landslides and their formation mechanism along Pingding Huama active fault in Bailongjiang River region. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(2): 574-583 (杨为民, 黄晓, 张春山, 司海宝. 2014. 白龙江流域坪定—化马断裂带滑坡特征及其形成演化. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(2): 574-583) [DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201402201]
- Yu Z S. 2007. Study on prediction of disaster loss and causes of Xieliupo landslides. *Gansu Science and Technology*, 23(12): 72-76 (余志山. 2007. 泄流坡滑坡灾害损失预测及成灾方式研究. *甘肃科技*, 23(12): 72-76) [doi: 10.3969/j.issn.1000-0952.2007.12.027]

- Zhang J X, Gong J, Ma X C and Liu D Q. 2018. GeoDA-based spatial correlation analysis of landscape fragmentation in Bailongjiang Watershed of Gansu. *Chinese Journal of Ecology*, 37(5): 1476-1483 (张金茜, 巩杰, 马学成, 柳冬青. 2018. 基于GeoDA的甘肃白龙江流域景观破碎化空间关联性. *生态学杂志*, 37(5): 1476-1483) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201805.017]
- Zhang Y. 2018. Detecting Ground Deformation and Investigating Landslides Using InSAR Technique—Taking Middle Reach of Bailong River Basin as an Example. Lanzhou: Lanzhou University (张毅. 2018. 基于InSAR技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究——以白龙江流域中游为例. 兰州: 兰州大学)
- 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*, 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]
- Zhang Y J, Wan Z, Xie C, Shao Y, Yuan M H, Chen W and Wang X. 2015. Deformation analysis of the seawall in Qiantang estuary with multi-temporal InSAR. *Journal of Remote Sensing*, 19(2): 339-354 (张云俊, 万紫, 谢酬, 邵芸, 袁名欢, 陈武, 王新. 2015. 基于时间序列雷达干涉测量的钱塘江海塘形变分析. *遥感学报*, 19(2): 339-354) [DOI: 10.11834/jrs.20154055]
- Zhao F M, Zhang Y, Meng X M, Su X J and Shi W. 2019. 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. 2019. 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]

Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique

LI Yuanxi^{1,3}, ZHANG Yi^{1,3}, SU Xiaojun^{2,3}, ZHAO Fumeng^{2,3}, LIANG Yiwen^{1,3}, MENG Xingmin^{1,3,4}, JIA Jun⁵

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

2. College of Earth and Environmental 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. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, 710054, China

Abstract: The Bailong River Basin is located in the southeast of Gansu Province and situated at the intersection of the Qinghai - Tibet Plateau, the Loess Plateau, and the Sichuan Basin. Geohazards, such as landslides and debris flows, have high frequency and wide distribution due to the impact of rainfall, tectonic activity, and earthquakes. These phenomena pose a serious threat to the safety of life and property of the local people. Investigating a new method to detect potential landslide and study its characteristics is important to provide key supports for local disaster prevention and mitigation. In this study, an InSAR technique called Small Baseline Subset was selected to process 60 Sentinel-1A SAR images acquired from March 2018 to March 2019. Moreover, the study area was clipped into 8 blocks to improve the efficiency of data processing and minimize the errors caused by the complex terrain of the region. On the basis of the abovementioned method, the mean surface displacement rates ranging from -158 and 100 mm/year along the line-of-sight direction were detected during March 2018 and March 2019. A total of 114 potential landslides were investigated and identified in the Bailong River Basin based on optical image interpretation and field survey. Statistical analysis of their basic information shows that most of the potential landslides tend to develop in the S, SSW, and SSE-faced slope with a gradient of 20° — 40° . The elevation difference of potential landslides is less than 150 m. The slope material is mostly composed of slope deposits and heavy weathered rocks, such as phyllite. The majority of potential landslides have an area less than 5×10^4 m². Yahuokou landslide, which was investigated as a potential landslide with displacement rates > 38 mm/year, broke and ran into Min River from 19 July 2019. On the basis of the analysis of landslide pre-cursory deformation and geomorphology, the landslide was divided into three sections: source, propagation, and accumulation areas. The successful identification of potential landslide demonstrates the applicability and efficiency of InSAR technique in landslide investigation and identification. This research provides foundation and scientific support for landslide mapping and disaster prevention in Bailong River Basin.

Key words: Bailong River Basin, potential landslide, InSAR, ground deformation, early identification, characteristics, Yahuokou landslide
Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC1501005); Science and Technology Major Project of Gansu Province (No. 19ZD2FA002); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. lzujbky-2019-28, lzujbky-2020-sp03); Geological survey project of China Geological Survey (No. DD20190714)