引用格式:刘星洪,姚鑫,杨波,等,2023.川西高原活动性滑坡识别与空间分布特征研究[J].地质力学学报,29(1):111-126.DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022024

Citation: LIU X H, YAO X, YANG B, et al., 2023. InSAR-based indentification and spatial distribution analysis of active landslides in the Western Sichuan Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 111–126. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022024

川西高原活动性滑坡识别与空间分布特征研究

刘星洪^{1,2},姚 鑫^{1,3},杨 波⁴,汤文坤^{1,3},周振凯^{1,5} LIU Xinghong^{1,2}, YAO Xin^{1,3}, YANG Bo⁴, TANG Wenkun^{1,3}, ZHOU Zhenkai^{1,5}

- 1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
- 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;
- 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室,北京 100081;
- 4. 云南地矿工程勘察集团有限公司,云南昆明 650041;
- 5. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京100083
- 1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;
- 3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Beijing 100081, China;
- 4. Yunnan Geology and Mineral Engineering Survey Group Co., Ltd., Kunming 650041, Yunnan, China;
- 5. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

InSAR-based indentification and spatial distribution analysis of active landslides in the Western Sichuan Plateau

Abstract: The Chengdu plain westward to the Songpan-Ganzi fold belt is a transition zone from basin to plateau. The region has huge undulation and fall, strange and steep terrain, severe river undercutting and erosion, frequent tectonic activities, and strong internal and external dynamics, resulting in frequent earthquakes and numerous geological hazards. The article uses Sentinel-1A data covering the whole region and ALOS-2 data in key areas for InSAR technology processing, combined with GIS spatial analysis, early identification of active landslide disasters in the study area and exploration of spatial distribution patterns, supplemented by field surveys to support the following understanding. According to the inducing factors of the disaster, the areas where the disaster points are concentrated can be divided into three zones: disaster zones induced by reservoir storage, such as Maoergai Reservoir in Heishui County; disaster zones caused by broken mountains after the earthquake, such as the junction of Minjiang River and Heishui Gully in Maoxian County, the area from Wenchuan County to Li County, and the area from Jiuzhaigou County to Shijiba Town; disaster zones cause by essential rivers, such as Zhouqu County, Lazikou Town, Xiaojin County, and Danba County. The active landslides in the region are mainly distributed in metamorphic rocks such as phyllite and clastic rocks such as shale. The disasters are mainly distributed in the terrain with aspects of SE, E, NE, slope greater than 15°, elevation interval of $1000 \sim 3000$ m, relative elevation difference greater than 1000 m, and curvature between $-0.5 \sim 0.5$. The disaster points are mainly close to the Minjiang fault, the Tazang fault, the Guanggaishan-Northern Dieshan fault, and the Maowen-Wenchuan fault zone. The combination of orbit-ascending and orbit-ascending data of Sentinel-1A increases the effective observation area to 73.41% of the total area. The ALOS-2 data are relatively better than the Sentinel-1A data in the western Sichuan

基金项目: 国家自然科学基金项目(41731287); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221738-2)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41731287), and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221738-2).

第一作者:刘星洪(1994一),女,在读博士,主要从事地质构造与地质灾害研究。E-mail:811981187@qq.com

通讯作者:姚鑫(1978一),男,博士,研究员,主要从事地质灾害与InSAR研究。E-mail: yaoxingphd@163.com

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-08-02; 责任编辑: 吴芳

plateau area. The coincidence rates of ALOS-2 and Sentinel-1A are 58.7% and 44.8%, respectively, in Jiuzhaigou and Maoxian, and the identified number of the former is 3.98 times and 1.39 times that of the latter. **Keywords:** Western Sichuan Plateau; fault; landslide; InSAR; GIS; geohazards

摘 要: 成都平原向西至松潘--甘孜褶皱带完成了从平原到高山峡谷区的转变,区域内起伏落差巨大,地 势奇峻,河流下切侵蚀严重,构造活动频繁,地震频发,内外动力作用强烈,地质灾害众多。文章利用 覆盖全区的 Sentinel-1A 升降轨数据以及重点区域的 ALOS-2 数据进行 InSAR 技术处理,结合 GIS 空间分 析,对研究区活动性滑坡进行早期识别以及空间分布规律的探索,再辅以部分野外调查佐证,获得了以 下认识:研究区滑坡集中分布地区按其诱因可分为水库蓄水诱发灾害区(黑水县毛尔盖水库)、震后破 碎山体灾害区(茂县岷江与黑水沟交界、汶川至理县一带、九寨沟至石鸡坝镇一线)和重要河流灾害区 (舟曲、腊子口镇、小金县和丹巴县);区域内活动性滑坡主要分布于千枚岩等变质岩和泥页岩等碎屑 岩中;主要地形范围为坡向南东、东、北东向,坡度15°~40°,高程区间1000~3000 m,相对高差>1000 m; 主要分布断裂有岷江断裂、玛曲-荷叶断裂、光盖山-迭山北麓断裂和茂汶-汶川断裂。Sentinel-1A 升降轨 数据的结合,使得有效观测区域提高到研究区面积的 73.41%。在川西高原区 ALOS-2 数据相对优于 Sentinel-1A 数据, ALOS-2 和 Sentinel-1A 数据在九寨沟和茂县重叠区识别的结果重合率为 58.7% 和 44.8%, 识别数量前者分别是后者的 3.98 倍和 1.39 倍。

关键词:川西高原;断裂;滑坡;InSAR;GIS空间分析;地质灾害 中图分类号:P642.22 文献标识码:A 文章编号:1006-6616(2023)01-0111-16 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022024

0 引言

四川省西部大渡河以北、白龙江以南地区很大 程度受到东西向挤压应力的影响,完成了从平原到 高山峡谷区的巨大转变。这一转变造成了青藏高 原东缘独特的地貌形态,也意味着该区域板块边缘 运动特征显著,断裂活动频繁,地震频发(杨国华 等,2003;秦宇龙等,2021)。21世纪以来,国内大地 震多发于此,影响较大者诸如 2008 年 Ms 8.0 级的汶 川地震(徐锡伟等, 2008)、2013年 Ms7.0级的芦山地 震(昌坚等, 2013)以及 2017 年 Ms 7.0 级的九寨沟地 震(姚鑫等, 2017)等。区域内构造活动所引起的隆 升和河流下切为滑坡等地质灾害的孕育提供了复 杂的地形条件(彭建兵等, 2004),形成的松散堆积 物为滑坡发生提供了丰富的物源条件(殷跃平, 2009), 所产生的应力为滑坡破坏提供了一定的动 力条件(唐辉明, 2008; 张永双等, 2016), 高发的地震 活动则给滑坡发生提供了触发因子(崔鹏等,2008; Dai et al, 2011; Xu and Xu, 2014)。在内外动力耦合 作用下,区域内滑坡具有其独特的分布方式及特征。

龙门山一带地势复杂、植被覆盖较厚,活动性 滑坡的调查难度较大,传统的人力排查难以高效进 行。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术作为天-地-空一体化的多源立体观测体系的重要一环,具 有全天时全天候、大范围、非接触、可回溯和高性 价比等优势,是大范围滑坡识别的重要手段之一 (许强等, 2019; 葛大庆等, 2019)。目前, InSAR 技术 已经被广泛应用于青藏高原"泛三江地区"(姚鑫 等, 2020)、四川高山区(赵宝强, 2019; 王之栋等, 2020;李媛茜, 2021)、黄土高原区(姚闯闯等, 2022) 等地区的大范围活动性滑坡的识别。此次研究区 东起龙泉山,西临若尔盖盆地,南抵大渡河,北至白 龙江,包含了成都平原和松潘-甘孜褶皱带的一部 分。通过大批量的升降轨数据,利用 InSAR 技术与 空间分析相结合的方法,对研究区活动性滑坡进行 识别,分析研究区滑坡分布与地形地貌、断裂构造 和地层岩性之间的关系;并对不同 SAR 数据识别的 活动性滑坡进行对比分析,以探讨了 InSAR 技术在 活动性滑坡识别领域的可行性和不同 SAR 数据在 该区域的识别能力。

1 区域地质背景

印度板块与欧亚板块的强烈碰撞导致青藏高原 东缘的快速隆升,研究区自东南往北地形起伏较 大,高差达6000m以上。由于快速隆升带来的河流 侵蚀下切作用强烈,区内发育多条河流,东西向河 流有白龙江,南北向河流有岷江、大渡河等,均为长 江的重要支流,水流量较大。研究区平原地区属山 地亚热带湿润季风气候,年平均气温 12~20 ℃, 雨热同期,年降雨量约 1400 mm 以上;山区属于高 山高原高寒气候区,河谷干暖、山地湿冷,年平均气 温约 4~12 ℃,相对缺少迎风降雨,年平均降水量一 般在 800 mm 以下。

研究区是华北板块、扬子板块和羌塘陆块汇集 之所,构造运动强烈,活动断裂分布较多(图1)。区 域内主要分布中一新生代逆冲推覆造山运动形成 的龙门山断裂带,该断裂带走向北东,倾向北西,倾 角约50°~70°,主要分为后山断裂(平武-青川断 裂)、中央断裂(北川-映秀断裂)、前山断裂(江油-广元断裂)和山前隐伏断裂,断裂带东侧分布多条 与之平行的小断裂。龙门山断裂带附近地震活动 较为强烈(图1), M_s5.0级以上地震震中多分布于北川-映秀断裂附近, 反映了龙门山断裂带的活动特点为 重复性和继承性(杨珍, 2017)。此外, 研究区还分 布多条北西走向断裂, 如白龙江断裂、岷江断裂、 虎牙断裂、光盖山-迭山北麓断裂等, 其中, 虎牙断 裂周边 M_s5.0级以上地震活动较为频繁。

研究区地层跨越多个时代,复杂多样,东侧主 要分布第四纪的冲洪积砾、砂砾以及砂质黏土;西 侧大范围分布三叠纪时期的变质砂岩、板岩等;中 部主要分布有侏罗一白垩纪时期的砂岩泥岩,志留 纪时期的千枚岩板岩,泥盆纪时期的炭硅质岩、变



图 1 研究区及其周边地形地貌、活动断裂及 M₈ 5.0 级以上地震分布图

Fig. 1 Map showing the surrounding topography, active faults and earthquakes ($\ge M_8 5.0$) in the study area

泥砂质岩,震旦纪时期的砂岩页岩和板岩,石炭一 二叠纪时期的碳酸盐岩等,其间还分布有南华纪的 花岗岩及晚太古代到早元古界的斜长角闪岩、混合 片麻岩变粒岩浅粒岩等(王之栋等,2020)。

研究区作内外动力作用都较为强烈,滑坡等地 质灾害时常发生。其西北部是典型的高山峡谷区, 地势奇峻,地层复杂多样,为滑坡的发育提供了丰 富物源;加之构造活动强烈,地震频发,雨热同期, 部分地区存在冰川融水等现象,为滑坡的发生提供 了多个诱发条件。

2 技术流程与方法研究

2.1 技术流程

根据研究区的基本概况,利用 InSAR 技术与空间分析相结合的方法,形成了数据选取→地表变形 监测→滑坡解译→野外验证→解译结果分析的一套 关于研究区活动性滑坡灾害研究的技术流程,如 图 2 所示。

2.2 数据选取与技术处理

选取了 2019年1月至 2020年3月期间覆盖整 个研究区的 Sentinel-1A 升轨和降轨 SAR 影像数据 共 722 期作为主要数据集,使用日本宇航局所提供 的 30 m 的 ALOS_World_3D 数字高程模型(DEM)去 除地形相位并进行地理编码;同时,对九寨沟、茂县 和丹巴-小金县等重点研究区选用了 ALOS-2的 SAR 影像数据来进行数据补充(图 3,表1)。

前期使用 D-InSAR 技术进行计算。首先,对前 述选择的同一地区重复观测的 SAR 图像进行干涉 计算,所得的干涉图包含了地表变形信息和其他因 素所引起的误差,利用 DEM 数据去除地形相位,根 据卫星飞行参数等去除轨道误差和观测向斜距误 差,建立大气模型滤波处理去除大气误差,获得各 干涉对的形变信息。再将质量较高的差分干涉相 位图进行叠加,即使用 Stacking-InSAR 技术,最大程 度的减少大气误差,提高变形精度测量,获得完整 的地表形变测量结果。

2.3 滑坡解译

根据 InSAR 计算的原理可得,不同的相位和强 度信息反映的地表的特征有所差异,若地表出现变 形,干涉影像中会出现相应的图斑异常现象。在解 译初期,需对 InSAR 观测所得的升降轨变形影像进 行坐标转换,对影像中存在图斑异常的地区进行重



图 2 活动性滑坡研究的技术流程图

Fig. 2 Workflow of studying active landslides

点标注。然后,根据不同情况(变形清晰完整边界、 变形微弱局部清晰和变形不连续等)的图斑异常现 象来圈定变形范围,再辅以光学遥感影像和 DEM 高程信息所反映的地形信息、地貌特征和地层岩性 等基础地质条件对变形点初步判定的活动性滑坡, 进行定性分析。

2.4 活动性滑坡分布特征

通过对 ALOS-2 和 Sentinel-1 多期数据的统一解 译处理(去除重合部分),在川西高原超过 13×10⁴ km² 的区域,得到活动性滑坡 1173 处,整体沿西北部高 山峡谷区发育,东南部平原地区则因地势低缓较少 出现滑坡灾害。从滑坡分布区域来说(图 4),区域 内活动性滑坡分布较集中的区域有 8 处,分别为黑 水县毛尔盖水库(A)、茂县岷江与黑水沟交界(B)、 汶川至理县一带(C)、九寨沟至石鸡坝镇一线(D)、 舟曲县(E)、腊子口镇(F)、小金县附近(G)和丹巴县(H)。

3 研究区滑坡发育规律

3.1 与地形地貌相关的发育规律

滑坡的发生与地形地貌的特征息息相关。对研 究区域内滑坡的坡度、坡向、高程和相对高差等进 行统计分析(图 5),可以看出活动性滑坡在不同的



图 3 所选 SAR 数据的覆盖范围示意图 Fig. 3 Coverage of the selected SAR data

地形地貌条件下的分布情况。

从坡度分析,研究区各区段滑坡分布特征鲜明,坡度范围在0°~10°的平缓地区面积占比较大,约占全区的27.01%,而滑坡占比仅6.22%,为滑坡低发区域;坡度范围在10°~15°的地区占全区面积的10.07%,滑坡占比为10.74%,二者占比接近,处于滑坡发生的过渡区域;当坡度位于15°~40°区间时,面积占比60.28%,滑坡占比高达82.27%,为滑坡高发区域;当坡度更陡(>40°)时,面积占2.64%,滑坡仅占比0.77%,又转变为低发区域。

从坡向分析,8个方位面积占比接近,南东、 东、北东向是活动性滑坡高发坡向,西向则为低发 坡向,东西向呈相反的趋势。

从高程分析,研究区高程变化较大,从140m跨

越至 6500 m,在 0~2500 m 的高程范围内,滑坡的占 比随高程的增加而增加,超过 2500 m 的高程范围, 滑坡所占的百分比随着高程的增加而减少。

从相对高差分析,活动性滑坡占比基本随相对 高差的增加而增加,且在相对高差大于1000m的高 陡山区,面积占比58.75%,滑坡占比达92.58%。

统计表明,研究区活动性滑坡主要分布于坡度 范围 15°~40°,南东、东、北东向坡,高程范围为 1000~3000 m,相对高差>1000 m 的地形组合,这一 分布规律与其他地区的滑坡分布优势区域具有一 定的异同点。共性方面,研究区滑坡分布的坡度范 围为 15°~40°,这表明岩土体在地表一定范围内呈 现出稳定状态,当其达到临界值时,即出现变形破 坏现象,且反映了滑坡分布与坡度呈正相关的共性

表 1 研究区 SAR 数据基本参数

Table 1 Basic parameters of the SAR data

数据卫星	数据类型	数据区域	获取日期	入射角/(°)	轨道状态	SLC数据 分辨率/(m×m)
ALOS-2	Extra-fine	丹巴-小金县	20171117、20171229、20180209、	36.1791	升轨	1.43×2.13
			20180323、20180504			
			20171126、20171224、20180204、			
ALOS-2	Extra-fine	茂县	20180415、20180513、20180610、	36.1763	升轨	1.43×2.12
			20180708			
ALOS-2	Extra-fine	茂县	20171207、20180104、20180201、	32.4006	降轨	1.43×1.82
			20180301、20190329、20180426			
ALOS-2	Extra-fine	九寨沟	20180113、20180310、20180407、	39.6627	降轨	1.43×1.84
			20180922、20181103、20181201、			
			20190112、20190309、20190323、			
			20190601、20190713、20190810、			
			20190921、20200111、20200208、			
			20200418			
ALOS-2	Extra-fine	九寨沟	20171210、20180121、20180304、	42.8997	升轨	1.43×2.21
			20180429、20180624、20180819、			
			20180916、20181028、20181223、			
			20190120、20190203、20190414、			
			20190512、20190707、20190901、			
			20191013、20191208、20191222、			
			20200119、20200216、20200301、			
			20200329、20200412			
Sentinel-1A	ТОР	轨道55,窗口97、102、107		39.56	升轨	13.98×2.33
		轨道26,窗口88、93、98	201901—202003			
		轨道128,窗口89、94、99、104				
		轨道62,窗口479、484、489、494				
Sentinel-1A	TOP	轨道135,窗口483、488、493	201901—202003	39.55	降轨	13.98×2.33
		轨道164,窗口485、490				

(Xu et al, 2014; 刘星洪等, 2018; 姚佳明等, 2022); 而 当坡度>40°时, 滑坡发育趋于平稳, 反映了高陡地区 松散堆积物逐渐减少的特点(戴福初和邓建辉, 2020); 相对高差>1000 m 的高陡山区滑坡占比较大 则表明了滑坡与起伏度成正相关关系(许丽等, 2017; 曹鹏举等, 2021)。个性方面, 研究区南东、 东、北西向坡滑坡发育, 不似寻常的二向性发育, 表 明其与河流行迹等相关性降低, 与研究区整体呈自 西向东逆冲的动力传播方向一致(许冲和肖建章, 2013)。

3.2 与断裂构造相关的发育规律

研究内断裂纵横交错,分布密度高。通过统计 滑坡与其相邻断裂的距离来初步判定区内断裂与 滑坡分布的关系(图 6),可以看出区内 83.97% 的滑 坡分布在距断裂 15 km 的范围内,且从滑坡分布整 体趋势来看,具有距离断裂越远,滑坡分布密度降 低的特点。研究区内同一断裂附近超过 20 个滑坡点 的有 10 条断裂,滑坡超过 100 个的有 4 条断裂,依次 是岷江断裂(192 个)、玛曲-荷叶断裂(181 个)、光盖山-迭山北麓断裂(160 个)和茂汶-汶川断裂(105 个)。

3.3 与地层岩性相关的发育规律

不同的地质单元对滑坡发生的敏感性有所不同,因而根据区域内岩层分布特点,将研究区地层分为6大类(图7),分别是以花岗岩为代表的侵入 岩类,以玄武岩为代表的喷出岩类,以千枚岩、板 岩、片岩为代表的变质岩类,以灰岩、白云岩为代 表的碳酸盐岩类,以泥岩、砂岩和页岩为代表的碎 屑岩类以及第四系地层。根据图7可以看出,研究 区内分布最多的岩组是变质岩组和碎屑岩,分别占 37.59%和34.86%。区内的滑坡占比则分别达到54.82% 和 30.69%,同向相比,区内变质岩区域比碎屑岩区 域滑坡分布更为密集。研究区内第四系地层分布 占全区面积的12.04%,而滑坡占比仅1.28%,究其原 因,第四系地层多分布于东南平原区,地势低缓,滑 坡发育较少。

4 典型灾害区特点

研究区内滑坡分布较为密集的区域共8处(图4), 根据各灾害区的地形地貌、构造活动、地理位置等



图 4 依据 InSAR 地表形变结果解译的活动性滑坡分布图 Fig. 4 Distribution of active landslides interpreted by the InSAR technology

影响因素综合分析可将其分为3大类,A区主要为 水库蓄水诱发灾害区,B、C、D区为震后破碎山 体灾害区,E、F、G和H区主要为重要河流灾害集 中区。

4.1 水库蓄水诱发灾害区

A区(图 8)位于黑水县以东的毛尔盖水库,主 要地层为三叠系中统杂谷脑组的石英砂岩、板岩夹 灰岩以及上统侏倭组的石英砂岩,砂质、钙质板岩 和粉砂岩的韵律互层。周边大的活动断裂为岷江 断裂,距离超过 45 km, A 区整体受断裂影响较小, 但其位于青藏高原东缘,整体属于受挤压状态,存 在小背斜和小断裂。从图 8a 中可以看出,水库两岸 多处出现超一周期的条纹变化的图斑异常现象。 经统计可得,A区直接受水库影响的滑坡有26处, 占区域内滑坡数量的65%。从现场调查情况来看, 水库水位周期性波动和动水压力变化,使得岸坡在 饱水和失水的过程中出现变形破坏,造成区内水库 滑坡(罗晓红和李进元,2003;秦洪斌,2011;李长冬 等,2020)。除了水库蓄水影响,A区(图8)内滑坡 还受到其他地质因素的影响,表现为东向坡的图斑 异常现象较西向坡更为明显,究其原因,是由于东 向坡较西向坡缓,但东向坡为顺向斜坡,给滑坡发 育提供了一定的地质条件,随着水库水位的升降, 坡脚多处失稳,出现变形。



a一坡向; b一坡度; c一高程; d一滑坡相对高差

图 5 解译滑坡地貌因子统计

Fig. 5 Statistics of geomorphologic factors of interpreted landslides

(a) Aspect ; (b) Slope ; (c) Elevation ; (d) Relative height



图6 解译滑坡与相邻断裂距离统计分析

Fig. 6 Statistics of distance between landslide points and adjacent fractures

4.2 震后破碎山体灾害区

受2008年汶川地震以及2017年九寨沟地震影 响,靠近震中地区山体具有多裂缝、表层多松散堆 积等特点(乔彦肖等,2009;祁生文等,2009;郭迅, 2009),这为山体发生变形提供了一定的物质基 础。从滑坡集中分布的位置(图4)来看,B区和 C区为汶川地震影响区,D区为九寨沟地震影响 区。除前述特点外,各区的滑坡分布特点因其他地 质条件的不同也存在差异。 B区(图9)位于茂县岷江和黑水沟交界处,该区 地层主要是志留系千枚岩、板岩夹变泥砂质岩和泥 盆系变泥砂质岩、炭硅质岩。B区位于岷江断裂南 端,且与茂汶-汶川断裂较近,受活动断裂影响较 大。根据图斑显示,区内滑坡较为密集,但是整体 变形量不大,仅岷江和黑水沟交界处(图9d)和石大 关乡(图9c)滑坡变形量较周边大。经现场调查显 示,区内多为表层崩坡积物滑动或老滑坡堆积物再 滑动。两处滑坡均为高剪出口滑坡,现今岷江和黑



图7 解译滑坡地层岩性统计

Fig. 7 Statistical analysis of formation lithology of interpreted landslides

水沟交界处滑坡已做排水沟处理,石大关乡滑坡则 做了格构支护、铺设监测设备等防护措施。

C区(图 10)位于汶川至理县一段,受茂汶-汶川断裂影响,地层错综复杂,主要分布有志留系 千枚岩、板岩、大理岩, 泥盆系平移铺组一观雾山 组碎屑岩和侵入岩的花岗岩等。C区为2008年 *M*_s8.0 汶川地震的重要破坏区域, 多滑坡堆积体。 区内滑坡甚为密集, 且在岷江左岸出现图斑异常现 象较右岸更多(图10a、10b)。从地层岩性角度来 看, 左岸为千枚岩地层, 右岸为花岗岩, 左岸相对稳 定性较差; 从地形条件来看, 左岸现为顺向坡、多滑 坡堆积体, 右岸为高角度斜坡、坡体较陡, 表层物质 直接落入岷江随江而下, 因而出现左岸坡体变形更 强烈的现象(图10c)。

D区(图 11)位于九寨沟至文县石鸡坝镇一段, 主要地层为三叠系中统杂谷脑组石英砂岩、板岩和 中统南坪塔藏组硅质板岩等。区内主要发育有玛 曲→荷叶断裂等活动断裂;受 2017年 M_s7.0级九寨 沟地震影响,区内滑坡分布较为密集,且越靠近震 中灾害分布越发密集。D区存在一处特别之处



a-InSAR变形图; b-解译结果图; c、d-野外典型照片

(a) InSAR-observed deformation map; (b) Distribution map of landslides; (c and d) Typical field photos

图 8 A 区滑坡分布及野外典型照片

Fig. 8 Distribution map of landslides and typical field photos of Zone A



a-InSAR变形图; b-解译结果图; c、d-野外典型照片

图 9 B 区滑坡分布及野外典型照片

Fig. 9 Distribution map of landslides and typical field photos of Zone B

(a) InSAR-observed deformation map; (b) Distribution map of landslides; (c and d) Typical field photos

(图 11a、11b),即在石鸡坝镇东侧山体出现的一系 列线状分布滑坡。根据现场调查,这一系列滑坡基 本位于活动断裂控制范围内,滑坡体物质均表现为 表层黄土覆盖于灰岩岩块之上,且存在断层碎屑物 质出露,给滑坡发生提供了便利条件。

4.3 重要河流灾害集中区

研究区南部大渡河和北部白龙江流域因河流侵 蚀下切和侧蚀作用等对坡体产生较大的冲击,降低 了坡体的稳定性从而发生地质灾害(郭京平,2019); 且由于强烈的挤压作用,这两条河流附近均存在较 为明显的活动断裂,如白龙江流域主要发育有白龙 江断裂和光盖山-迭山北麓断裂,大渡河两岸则主 要发育有大渡河断裂、鲜水河断裂等,对区内的地 质灾害具有一定的影响作用(李淑贞等,2015;郭长 宝等,2015)。白龙江沿线地层杂乱无章,地质灾害 众多,相对集中区域有舟曲县周边(E区)以及腊子 口镇 S313 沿线(F区)。大渡河相较研究区北部白 龙江沿岸变形区域较少,主要变形区分布在丹巴县 (G区)和小金县(H区),泸定、汉源和峨边偶有分布。

E区位于白龙江流域舟曲县附近,分布有光盖山-迭山北麓断裂和白龙江断裂,区内大变形分布 于舟曲县西侧山坡和东侧果耶乡(图12a、12b)。西 侧山坡岩性有石炭系的灰岩和泥盆系灰岩、板岩 等,存在明显变形迹象,且规模较大,威胁县城居 民;果耶乡则主要分布志留系深灰、灰黑色含碳硅 质板岩、硅质岩、变砂岩、千枚岩等,滑坡密集分布 于冲沟内,给泥石流发育提供了物源。

F区位于腊子口镇S313沿线,为白龙江断裂与 光盖山-迭山北麓断裂中间区域,区内多为志留系 千枚岩板岩和泥盆系层状灰岩、泥灰岩,根据解译 结果,滑坡集中分布在道路两岸,且越靠近断裂,滑 坡越多(图12c、12d)。



a-InSAR变形图; b-解译结果图; c、d-野外典型照片

图 10 C 区滑坡分布及野外典型照片

Fig. 10 Distribution map of landslides and typical field photos of Zone C

(a) InSAR-observed deformation map; (b) Distribution map of landslides; (c and d) Typical field photos

G区位于大渡河支流小金川两岸的小金县附近,区内主要发育有三叠系侏倭组变质砂岩、粉砂岩、板岩互层,杂谷脑组厚层块状变质细砂岩夹板岩及透镜状灰岩等,无明显断裂构造发育。区内滑坡位于宽谷两岸,且多为东向坡,推测顺坡向变形较多(图 12e, 12f)。

H区位于大渡河两岸的丹巴县范围内,主要分 布地层为志留系茂县群片岩夹条带状大理岩地层, 在丹巴县北侧分布有北西向逆冲断层。区内滑坡 主要分布在河流西侧,多为老滑坡堆积体的局部滑 动;河流东侧山体因地势高陡、崩坡积物被河流冲 刷搬运,从而较少出现蠕变现象(图 12g、12h)。

5 讨论

5.1 InSAR 技术识别滑坡灾害点的可行性分析

研究区覆盖范围广,地势崎岖,野外调查验证

工作尚不能完全落实到每一处滑坡。根据已经验证的滑坡解译结果来看,约有85%的解译区在现场能观察到诸如表层剥落、后缘拉张裂缝、树木倾倒、建筑物破坏等明显的变形迹象,这表明了InSAR 技术在活动性滑坡的识别方面具有一定的可靠性。

从滑坡的识别规模来看,使用的 Sentinel-1A 数据经过 10×2 的多视,其影像像元为地距分辨率约 30 m 的方格,解译所得的研究区滑坡面积范围为 0.8×10⁴~450×10⁴ m²,从小型滑坡至大型滑坡均有分布,滑坡监测范围广、跨度大,这表明 InSAR 技术基本符合研究区滑坡识别的要求。

从相干性角度考虑,研究区为高植被区,一般 来说,长波段的卫星穿透能力更强,更具监测优势, 但是,由于 Sentinel-1A 重返周期短,数据量大,重复 观测期间观测目标的后向散射特性保持稳定,时间 相干性强,能够减少一些失相干现象,对研究区滑 坡灾害监测有利。由于 SAR 数据是雷达卫星侧视 103°50

104°0

104°10'

 $40 \,\mathrm{km}$

104°20'





 a
 C
 石鸡坝镇
 文里

 道路
 河流
 断裂
 文 东雪,

 G
 G
 G
 G

 J
 J
 J
 J
 J

 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 J
 <

a-InSAR变形图; b-解译结果图; c、d-野外典型照片

图 11 D 区滑坡分布及野外典型照片

Fig. 11 Distribution map of landslides and typical field photos of Zone D

(a) InSAR-observed deformation map; (b) Distribution map of landslides; (c and d) Typical field photos

成像所得,因而会出现如阴影、叠掩和透视收缩等 几何畸变(Dun et al, 2021),根据计算可得,Sentinel-1A卫星升轨数据所产生的几何畸变(阴影、叠掩和 透视收缩)区面积约为4.69×10⁴ km²,占全区的 35.11%,低敏感区面积约为3.54×10⁴ km²,占全区的 26.51%;降轨数据所产生的几何畸变区面积约为 5.14×10⁴ km²,占全区的38.46%,低敏感区也占全区 的26.51%。这表明升降轨数据的有效观测区分别 占全区面积的38.38%和35.03%。升降轨数据的结 合,使得有效观测区域占全区面积的73.41%,提高 了研究区滑坡的监测率。综上所述,InSAR技术在 川西高原地区的活动性滑坡监测的研究应用中是 满足要求的。

5.2 ALOS-2 与 Sentinel-1A 解译结果重合度分析

研究区的九寨沟地区(图13a)、茂县地区(图13b) 和丹巴-小金县地区(图13c)分别使用了L波段的 ALOS-2数据和C波段的 Sentinel-1A数据。从图13 中可以看出,这两种数据所监测的结果存在一定的 差异。从解译滑坡的数量来看,九寨沟地区 ALOS-2 数据解译 183 处, Sentinel-1 数据解译 46 处, ALOS-2 解译滑坡数量是 Sentinel-1A 解译滑坡数量的 3.98 倍,重合 27 处,重合率(以 Sentinel-1A 解译结果为基 准)为 58.7%;茂县地区 ALOS-2数据解译 133 处, Sentinel-1数据解译 96 处, ALOS-2 解译滑坡数量是 Sentinel-1A 解译滑坡数量的 1.39 倍,重合 43 处,重 合率为 44.8%;丹巴-小金县地区 ALOS-2 数据解译 22 处, Sentinel-1 数据解译 64 处, ALOS-2 解译滑坡数 量是 Sentinel-1 数据解译 64 处, ALOS-2 解译滑坡数 量是 Sentinel-1 条子滑坡数量的 0.34 倍,重合 15 处, 重合率为 23.4%。

上述结果显示,由于丹巴-小金县地区仅使用 ALOS-2升轨数据而存在一定的几何畸变,因而 ALOS-2数据监测结果少于 Sentinel-1A 监测结果,九 寨沟地区以及茂县地区的 ALOS-2数据监测的滑坡 数量结果均多于 Sentinel-1A 数据监测结果。从数据 使用情况来看,将分辨率为 3m 的 ALOS-2 数据采用 4×4 多视,多视后其影像像元为地距分辨率约 10 m



a-E区 InSAR 变形图; b-E区解译结果图; c-F区 InSAR 变形图; d-F区解译结果图; e-G区 InSAR 变形图; f-G区解译结果图; g-H区 InSAR 变形图; h-H区解译结果图

图 12 E—H区 InSAR 变形图及解译滑坡分布图

Fig. 12 InSAR-observed deformation map and distribution map of landslides in Zones E-H

(a) InSAR-observed deformation map of Zone E; (b) Distribution map of landslides in Zone E; (c) InSAR-observed deformation map of Zone F;
(d) Distribution map of landslides in Zone F; (e) InSAR-observed deformation map of Zone G; (f) Distribution map of landslides in Zone G;
(g) InSAR-observed deformation map of Zone H; (h) Distribution map of landslides in Zone H

的方格, 解译所得的研究区滑坡面积范围为0.14×10⁴~480×10⁴ m², 较 Sentinel-1A 数据在解译小型活动性滑坡中的作用更加突出。无论是从数量还是对小型

滑坡的敏感程度上来看,在川西高原区 ALOS-2 数据较 Sentinel-1A 数据更优,对于 Sentinel-1A 数据的监测结果具有很好的补充作用。



a一九寨沟地区; b一茂县地区; c一丹巴-小金县地区

6 结论

利用 InSAR 技术对川西大渡河至白龙江一带的 活动性滑坡进行了早期识别研究,获得了研究区内 滑坡的分布情况,同时还得到了一些认识。

(1)研究区滑坡发育规律明显。区域内活动性 滑坡多分布于南东、东、北东向,坡度15°~40°, 高程区间1000~3000 m,相对高差>1000 m之间的高 陡地形范围内。滑坡与断裂的关系较密切,滑坡多 分布在距离断裂15 km范围内的区域,且具有距离 断裂越远,滑坡分布密度越低的特点。附近滑坡分 布超过100个的断裂有岷江断裂、玛曲-荷叶断裂、 光盖山-迭山北麓断裂和茂汶-汶川断裂。研究区 地层分布较为杂乱,整体来看,滑坡多分布于千枚 岩等变质岩和泥页岩等碎屑岩中。

(2)研究区滑坡集中分布地区按其诱因可分为 3种:①水位波动而产生的水库蓄水诱发灾害区,代 表地区为黑水县毛尔盖水库;②大型地震后山体失 衡或震后滑坡堆积体尚未完全稳定而形成的震后 破碎山体灾害区,代表地区为茂县岷江与黑水沟交 界、汶川至理县一带、九寨沟至石鸡坝镇一线; ③受河流冲刷作用影响或因沿河公路工程的建设 而造成的重要河流灾害集中区,代表地区为舟曲 县、腊子口镇、小金县和丹巴县。

(3) Sentinel-1A 升降轨数据的结合,有效地提高 了研究区滑坡变形的监测率,使得有效观测区域占 全区面积的 73.41%。ALOS-2 和 Sentinel-1A 在九寨 沟和茂县重叠区识别的结果重合率为 58.7% 和 44.8%, 识别数量前者分别是后者的 3.98 倍和 1.39 倍。在

图 13 ALOS-2 解译结果与 Sentinel-1A 解译结果对比图 Fig. 13 Comparison of landslides interpreted by ALOS-2 and Sentinel-1A (a) Jiuzhaigou; (b) Maoxian; (c) Danba-Xiaojin

125

川西高原区 ALOS-2数据相对优于 Sentinel-1A数据,对于 Sentinel-1A数据的监测结果具有很好的补充作用。

References

- CAO P J, CHENG S Y, LIN H X, et al., 2021. DEM in quantitative analysis of structural geomorphology: application and prospect[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 949-962. (in Chinese with English abstract)
- CUI P, WEI F Q, HE S M, et al., 2008. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation[J]. Mountain Research, 26(3): 280-282. (in Chinese with English abstract)
- DAI F C, XU C, YAO X, et al., 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 M_S 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 40(4): 883-895.
- DAI F C, DENG J H, 2020. Development characteristics of landslide hazards in three-rivers basin of Southeast Tibetan Plateau[J]. Advanced Engineering Sciences, 52(5): 3-15. (in Chinese with English abstract)
- DUN J W, FENG W K, YI X Y, et al., 2021. Detection and mapping of active landslides before impoundment in the Baihetan reservoir Area (China) based on the time-series InSAR method[J]. Remote Sensing, 13(16): 3213.
- GE D Q, DAI K R, GUO Z C, et al., 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: thoughts and recommendations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(7): 949-956.
- GUO C B, DU Y B, ZHANG Y S, et al., 2015. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan[J]. Geological Bulletin of China, 34(1): 121-134. (in Chinese with English abstract)
- GUO J P, 2019. Study on the influence of river erosion on landslide stability[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 55(11):38-41: 45. (in Chinese)
- GUO X, 2009. Characteristics and mechanism analysis of the great Wenchuan earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 29(6): 74-87. (in Chinese with English abstract)
- LI C D, LONG J J, JIANG X H, et al., 2020. Advance and prospect of formation mechanism for reservoir landslides[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(1): 67-77. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, DAI S, WANG H W, et al., 2015. Fault features and their implications on distribution and formation of landslides in Bailongjiang Region[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 51(2): 145-152. (in Chinese with English abstract)
- LI Y X, ZHANG Y, SU X J, et al., 2021. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique[J]. National Remote Sensing Bulletin, 25(2): 677-690. (in Chinese with English abstract)
- LIU X H, YAO X, ZHOU Z K, et al., 2018. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR[J]. Journal of Geomechanics, 24(2): 229-237. (in Chinese with English abstract)
- LUO X H, LI J Y, 2003. Analysis of reservoir impoundment influence on reservoir bank slide[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 19(3):61-64: 69. (in Chinese with English abstract)

LV J, WANG X S, SU J R, et al., 2013. Hypocentral location and source

mechanism of the $M_{\rm S}7.0$ Lushan earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(5): 1753-1763. (in Chinese with English abstract)

- PENG J B, MA R Y, LU Q Z, et al., 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 19(3): 457-466. (in Chinese with English abstract)
- QI S W, XU Q, LIU C L, et al., 2009. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5 · 12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 17(1): 39-49. (in Chinese with English abstract)
- QIAO Y X, MA Z S, LV F J, 2009. Characteristics and dynamic cause mechanism of the Wenchuan Earthquake geological hazards[J]. Geology in China, 36(3): 736-741. (in Chinese with English abstract)
- QIN H B, 2011. The mechanism of landslide influenced by rainfall and reservoir water level fluctuation and renewed criterion research in Three-Gorges reservoir[D]. Yichang: China Three Gorges University. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y L, WU J L, ZHAN H J, et al., 2021. Discussion on the correlation between active fault and geological disaster distribution in the Ganzi area, western Sichuan province, China[J]. Journal of Geomechanics, 27(3): 463-474. (in Chinese with English abstract)
- TANG H M, 2008. Gong Cheng Di Zhi Xue Ji Chu[M]. Beijing: Chemical Industry Press: 92-96. (in Chinese)
- WANG Z D, WEN X H, TANG W, et al., 2020. Early detection of geological hazards in Longmenshan-Dadu river Area using various InSAR techniques[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 45(3): 451-459. (in Chinese with English abstract)
- XU C, XIAO J Z, 2013. Spatial analysis of landslides triggered by the 2013 M_S7.0 Lushan earthquake: a case study of a typical rectangle area in the northeast of Taiping town[J]. Seismology and Geology, 35(2): 436-451. (in Chinese with English abstract)
- XU C, XU X W, 2014. The spatial distribution pattern of landslides triggered by the 20 April 2013 Lushan earthquake of China and its implication to identification of the seismogenic fault[J]. Chinese Science Bulletin, 59(13): 1416-1424.
- XU C, XU X W, YAO X, et al., 2014. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan M_W 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. Landslides, 11(3): 441-461.
- XU L, LI J H, LIU C H, et al., 2017. Research on geomorphological morphology and regionalization of Hoh Xil Based on digital elevation model (DEM)[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 53(5): 833-842. (in Chinese with English abstract)
- XU Q, DONG X J, LI W L, 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J].
 Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(7): 957-966. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, WEN X Z, YE J Q, et al., 2008. The M_S8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 30(3): 597-629. (in Chinese with English abstract)
- YANG G H, HAN Y P, WANG M, et al., 2003. Horizontal deformation in several major seismically active areas in Chinese mainland[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 23(3): 42-49. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z, 2017. Study on fault activity in Western Sichuan based on InSAR data[D]. Xi'an: Changan University. (in Chinese with English abstract)

- YAO C C, YAO X, GU Z K, et al., 2022. Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 257-267. (in Chinese with English abstract)
- YAO J M, YAO X, LIU X H, et al., 2022. Identification and analysis of active landslide disaster in Tianshui city using InSAR technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 47(1): 121-132. (in Chinese with English abstract)
- YAO X, ZHOU Z K, LI L J, et al., 2017. InSAR co-seismic deformation of 2017 M_S7.0 Jiuzhaigou earthquake and discussions on seismogenic tectonics[J]. Journal of Geomechanics, 23(4): 507-514. (in Chinese with English abstract)
- YAO X, DENG J H, LIU X H, et al., 2020. Primary recognition of active landslides and development rule analysis for Pan Three-river-parallel territory of Tibet Plateau[J]. Advanced Engineering Sciences, 52(5): 16-37. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2009. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 17(1): 29-38. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al., 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(3): 277-286. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO B Q, 2019. Surface deformation characteristics and early identification of potential landslides based on In SAR technology in Bailong river basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 曹鹏举,程三友,林海星,等,2021. DEM 在构造地貌定量分析中的应 用与展望[J].地质力学学报,27(6):949-962.
- 崔鹏,韦方强,何思明,等,2008.5·12汶川地震诱发的山地灾害及 减灾措施[J].山地学报,26(3):280-282.
- 戴福初,邓建辉,2020. 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征 [J]. 工程科学与技术,52(5):3-15.
- 葛大庆,戴可人,郭兆成,等,2019.重大地质灾害隐患早期识别中综 合遥感应用的思考与建议[J].武汉大学学报·信息科学版, 44(7):949-956.
- 郭长宝,杜宇本,张永双,等,2015.川西鲜水河断裂带地质灾害发育 特征与典型滑坡形成机理[J].地质通报,34(1):121-134.
- 郭京平,2019.河流侵蚀对滑坡稳定性影响研究[J].甘肃水利水电 技术,55(11):38-41,45.
- 郭迅,2009. 汶川大地震震害特点与成因分析[J]. 地震工程与工程 振动,29(6):74-87.
- 李长冬,龙晶晶,姜茜慧,等,2020.水库滑坡成因机制研究进展与展 望[J].地质科技通报,39(1):67-77.
- 李淑贞,戴霜,王华伟,等,2015.白龙江地区断裂构造与滑坡分布及 发生关系[J].兰州大学学报(自然科学版),51(2):145-152.
- 李媛茜,张毅,苏晓军,等,2021.白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与

发育特征研究[J]. 遥感学报, 25(2): 677-690.

- 刘星洪,姚鑫,周振凯,等,2018. 滑坡灾害 InSAR 应急排查技术方法 研究[J]. 地质力学学报,24(2):229-237.
- 罗晓红,李进元,2003.水库蓄水对库岸滑坡影响分析[J].水电站设计,19(3):61-64,69.
- 吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 等, 2013. 芦山7.0级地震序列的震源位置与 震源机制解特征[J]. 地球物理学报, 56(5): 1753-1763.
- 彭建兵,马润勇,卢全中,等,2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应 [J]. 地球科学进展,19(3):457-466.
- 祁生文,许强,刘春玲,等,2009.汶川地震极重灾区地质背景及次生 斜坡灾害空间发育规律[J].工程地质学报,17(1):39-49.
- 乔彦肖,马中社,吕凤军,2009.汶川地震地质灾害发育特点及动因机制分析[J].中国地质,36(3):736-741.
- 秦洪斌,2011. 三峡库区库水与降雨诱发滑坡机理及复活判据研究 [D]. 宜昌: 三峡大学.
- 秦宇龙,吴建亮, 詹涵钰,等, 2021. 川西甘孜地区活动断裂与地质灾 害分布相关性探讨[J]. 地质力学学报, 27(3): 463-474.
- 唐辉明, 2008. 工程地质学基础 [M]. 北京: 化学工业出版: 92-96.
- 王之栋, 文学虎, 唐伟, 等, 2020. 联合多种 InSAR 技术的龙门山-大渡 河区域地灾隐患早期探测 [J]. 武汉大学学报, 信息科学版, 45(3): 451-459.
- 许冲,肖建章,2013.2013年芦山地震滑坡空间分布分析:以太平镇 东北方向的一个典型矩形区为例[J].地震地质,35(2):436-451.
- 许丽,李江海,刘持恒,等,2017.基于数字高程模型(DEM)的可可西 里地貌及区划研究[J].北京大学学报(自然科学版),53(5):833-842.
- 许强, 董秀军, 李为乐, 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报・信息科学版, 44(7): 957-966.
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等,2008.汶川 M_s8.0 地震地表破裂带及其 发震构造[J]. 地震地质,30(3):597-629.
- 杨国华,韩月萍,王敏,等,2003.中国大陆几个主要地震活动区的水 平形变[J].大地测量与地球动力学,23(3):42-49.
- 杨珍,2017. 基于 InSAR 数据的川西地区断层活动研究 [D]. 西安:长 安大学.
- 姚闯闯,姚鑫,顾畛逵,等,2022. 基于 InSAR 识别的黄土高原活动性 地质灾害发育规律分析[J]. 地质力学学报,28(2):257-267.
- 姚佳明, 姚鑫, 刘星洪, 等, 2022. InSAR 技术的天水市活动性滑坡灾 害识别与分析[J]. 测绘科学, 47(1): 121-132.
- 姚鑫,周振凯,李凌婧,等,2017.2017年四川九寨沟 M_S7.0 地震 In-SAR 同震形变场及发震构造探讨[J]. 地质力学学报,23(4):507-514.
- 姚鑫,邓建辉,刘星洪,等,2020.青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR初步识别与发育规律分析[J].工程科学与技术,52(5): 16-37.
- 殷跃平,2009. 汶川八级地震滑坡特征分析 [J]. 工程地质学报, 17(1): 29-38.
- 张永双,郭长宝,姚鑫,等,2016.青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J].地球学报,37(3):277-286.