

DOI:10.13203/j.whugis20200263



文章编号:1671-8860(2020)11-1707-10

九寨沟震后滑坡隐患雷达遥感早期识别与形变监测

蔡杰华¹ 张路¹ 董杰² 董秀军³ 廖明生¹ 许强³

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

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

摘要:2017-08-08,中国四川省九寨沟县发生Ms 7.0级地震,此次地震震级大、震源浅、烈度高,造成了严重的人员伤亡与财产损失,并引发了大量山体崩塌、滑坡等次生灾害。利用合成孔径雷达干涉测量(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)技术对九寨沟地区开展潜在滑坡隐患早期识别与探测研究。首先,通过常规差分干涉测量(differential InSAR, DInSAR)技术处理分析6景先进陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)-2 L波段相控合成孔径雷达(phased array type L-band synthetic aperture radar, PALSAR)-2升轨数据,对研究区域进行了灾害隐患快速普查;然后,利用时间序列InSAR技术处理112景哨兵1号(Sentinel-1)升降轨数据,对重点区域进行精细详查分析。研究结果发现,在九寨沟地区共探测出13处滑坡隐患,其中7处毗邻居民区;进一步对重点滑坡隐患进行时序变形监测,发现多处滑坡自震后长期处于持续线性形变中,对当地人民生命财产安全构成潜在威胁。实地调查结果验证了基于InSAR技术的滑坡隐患早期识别与探测方法的可靠性,研究结果可为九寨沟地区防灾减灾提供重要的决策依据。

关键词:九寨沟;滑坡隐患;早期识别;差分干涉测量技术;时间序列干涉测量技术;形变监测

中图分类号:P237 文献标志码:A

2017-08-08,中国四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县发生Ms 7.0级地震,震中(103.82°E, 33.20°N)位于九寨沟核心景区内,震源深度大约20 km^[1]。据相关统计表明,此次地震造成25人死亡,520余人受伤,大量房屋建筑遭到不同程度损伤^[2]。由于此次地震震级大、震源浅、烈度高,同时该地区地质环境脆弱,地震触发了大量崩塌、滑坡等次生灾害,对九寨沟地区自然景观、生态环境和基础设施等造成了严重破坏^[3]。开展震后滑坡灾害隐患早期识别与探测,对于保障九寨沟景区的恢复重建和地质灾害防治具有重要的现实意义。

基于遥感影像解译的滑坡灾害隐患识别,相较传统的人工实地调查具有成本低、速度快、大范围覆盖等优势,近年来得到了广泛应用^[4-6]。同样,在九寨沟震后应急抢险救灾工作以及景区重

建修复工作中,基于遥感技术的滑坡灾害识别也发挥了重要作用。目前针对九寨沟震后滑坡遥感探测,主要是利用光学遥感检测震前/震后地表的光谱、纹理、形状、形态等特征信息的变化,通过目视解译或计算机自动解译等方式实现滑坡体的识别^[7]。然而光学遥感成像易受山区云雾遮挡影响,且仅能检测识别出地表已经发生显著变化的同震崩塌或滑坡^[8]。除同震崩塌、滑坡外,地震还会导致大面积山体震裂松动、各种松散固体物质堆积于沟谷和斜坡形成潜在滑坡隐患,后期降雨、人类活动等将进一步导致这类震裂松动山体和堆积固体物质失稳,将对九寨沟当地居民和游客的生命财产安全构成长期威胁^[9]。

20世纪末发展起来的合成孔径雷达干涉测量技术(synthetic aperture radar interferometry, InSAR),具备全天候、全天时主动工作能力,不受

收稿日期:2020-05-30

项目资助:四川省科技厅重点研发计划(2019YFS0074);四川省国土资源科研项目(KJ-2018-21);国家自然科学基金(41774006, 41904001, 41790445)。

第一作者:蔡杰华,博士生,主要从事面向地质灾害监测的InSAR技术研究。caijiehua@whu.edu.cn

通讯作者:张路,博士,教授。luzhang@whu.edu.cn

云雾天气的影响,可为滑坡早期识别、重点滑坡长期监测和灾害预警提供重要支持,已在中国西南^[10-12]、西北^[13-16]和三峡库区^[17]等地开展了大量相关应用研究。常规差分干涉测量(differential InSAR,DInSAR)技术可以捕获两景雷达影像覆盖期间滑坡体表面的微小形变信息,从而实现对滑坡隐患的早期识别与探测,但常规DInSAR技术无法获取目标区域沿时间维的演化情况,且应用效果往往受到时空去相干、大气延迟等影响^[18]。时间序列InSAR技术是在DInSAR基础上进一步发展而来,突破了DInSAR面临的时空去相干等瓶颈问题,可获得厘米甚至毫米级精度的时间序列形变信息^[19]。首先利用常规DInSAR技术开展大范围滑坡灾害普查,然后利用时序InSAR技术针对发现的重点隐患区域进行长时间序列形变追踪及持续更新,既兼顾效率又可以实现对重点区域的精准详查。

本文获取了震后覆盖九寨沟地区的先进陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)-2 L波段相控合成孔径雷达(phased array type L-band synthetic aperture radar, PALSAR)-2和C波段哨兵1号(Sentinel-1)数据,采用常规DInSAR和时间序列InSAR技术开展震后滑坡灾害隐患早期识别与探测工作,总计探测出滑坡灾害隐患13处,并选取其中潜在威胁最大的2处隐患为例进行了详细分析。实地调查核实验证了InSAR技术应用于九寨沟震后滑坡隐患早期识别与探测具有较高的可靠性。

1 InSAR滑坡灾害隐患识别与探测方法

常规DInSAR与时间序列InSAR这两种技术所适用的场景与应用需求各不相同。本文通过组合两种技术策略进行联合识别监测,以实现对九寨沟地区滑坡地质灾害的大范围识别和单体滑坡长期形变监测。

1.1 基于常规DInSAR技术的滑坡隐患普查

基于常规DInSAR技术识别和探测滑坡隐患,主要是利用DInSAR技术可以捕获滑坡在雷达视线(line of sight, LOS)方向上的微小形变信号这一特点,进行快速的大范围隐患探测。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)系统在两个不同时间对同一区域进行两次成像可以获取两幅单视复数影像,将这两幅影像配准重采样并共轭相乘形成一幅干涉图,干涉图中每个像元

的干涉相位包含该点相对于参考位置的高程和形变信息。在实际应用中,地表和大气环境在时间和空间上处在不断的变化中,因此不可避免地会影响干涉图中的干涉相位,进而影响最终的干涉测量结果^[20]。因此考虑各方面影响,干涉图中任意干涉相位 φ_{int} 可以表示为:

$$\varphi_{int} = W\{\varphi_{orb} + \varphi_{dem} + \varphi_{dis} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise}\} \quad (1)$$

式中, $W\{\cdot\}$ 为缠绕运算;干涉相位主要包括轨道差异引起的相位分量 φ_{orb} 、地形起伏 φ_{dem} 、地表形变 φ_{dis} 、大气相位延迟 $\Delta\varphi_{atm}$ 和噪声分量 $\Delta\varphi_{noise}$ 。

DInSAR技术的主要用途是准确提取由地表形变造成的形变分量 φ_{dis} 。式(1)中等号右边前两项可以利用传感器的轨道信息和数字高程模型(digital elevation model, DEM)准确模拟并从干涉相位中剔除,大气相位延迟 $\Delta\varphi_{atm}$ 和噪声分量 $\Delta\varphi_{noise}$ 可以通过各种滤波方法在一定程度上得到抑制消除。通过二维空间解缠就可以从干涉相位 φ_{dis} 中解算出地表形变,利用滑坡表现出的形变信号识别隐患。

常规DInSAR技术在实际应用中会受到大气延迟、时空失相干和DEM误差等各种因素的制约,在一定程度上影响最终的形变测量结果精度。同时,DInSAR技术仅能获得滑坡在某个时间段内的相对形变,无法反映滑坡在时间维的演化情况。但该技术仍然可以快速大面积地对存在微小形变的滑坡隐患进行识别探测,因此适合用于初步的区域隐患普查,至于滑坡隐患的详细演化情况,需要进一步处理分析。

1.2 基于时间序列InSAR技术的滑坡隐患详查

时间序列InSAR技术利用重复轨道观测获取的同一区域多幅SAR影像,对时间序列上相对稳定的目标进行精确分析,通过数据处理方法抑制消除大气延迟和时空失相干等影响,进而有效提高InSAR测量精度。时间序列InSAR技术最具代表性的为永久散射体干涉测量技术^[21](persistent scatter interferometry, PSI)与小基线集技术^[22](small baseline subsets InSAR, SBAS)。其中,永久散射体主要存在于城市区域,如建筑物、桥梁等,在山区等自然场景中较为少见,因此PSI技术在城市应用更为广泛;SBAS技术主要是针对分布式散射体(distributed scatterers, DS)提出的一种数据处理方法,DS广泛存在于自然场景中,如裸地、草地等。由于九寨沟地区属于典型山区,因此本文主要利用SBAS技术来实现对滑坡隐患时空演化的详细分析。

SBAS 技术通过短时空基线的多主影像组合策略,能够较好地克服时空失相干影响,尽可能地提取分布式散射体的有效信息。本文采用文献[23]提出的 SBAS 技术路线,主要技术流程如下:首先,设置合适的时间和空间基线阈值生成多主影像差分干涉图;其次,利用平均空间相干性选取相干像素点;然后,对多主影像差分干涉图进行二维相位解缠,并求解单主影像相位序列;最后,采用时空滤波估计校正大气延迟与高程误差,输出目标时序形变。SBAS 技术通过对干涉相位中的大气延迟、高程误差等进行相关分析,可以有效抑制消除各类误差,从而实现对式(1)中形变分量 φ_{dis} 的准确测量。

时间序列 InSAR 技术可以在一定程度上克服 DInSAR 技术的缺陷,提高滑坡形变测量精度,并且可以获得滑坡时空演化特征。然而时间序列 InSAR 技术需要目标区域有一定影像数据积累,大范围数据处理复杂,效率较低。因此,联合常规 DInSAR 隐患普查,利用时间序列 InSAR 技术对重点区域进行隐患详查,形成滑坡隐患探测策略组合,以实现对九寨沟地区滑坡地质灾害的大范围隐患识别探测和单体滑坡精确监测。

2 研究区域与实验数据

2.1 研究区域

九寨沟位于四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县境内,地处岷山山脉东北侧的复背斜上,是一条纵深 50 余 km 的山沟谷地。九寨沟地区地势整体表现为南高北低,地形复杂,平均海拔约 3 400 m,高差悬殊达 2 000 m,同时植物资源丰富,植被覆盖茂密。九寨沟地质环境复杂,新构造运动强烈,以碳酸盐岩分布为主,褶皱断裂高度发育,为地震滑坡等自然灾害频发区域^[24]。

2017 年九寨沟地震震级大、烈度高,最高烈度为Ⅷ 度,九寨沟景区及外围缓冲区均位于烈度为Ⅶ 到Ⅷ 度的强度影响范围内,如图 1 所示。本文研究范围以九寨沟地震震中为中心,覆盖地震烈度Ⅶ 度带及以上区域,重点关注漳扎镇周边及九寨沟核心景区。

2.2 实验数据

本文共选取了 118 景不同波段、不同轨道观测获取的星载 SAR 数据,包括 58 景 Sentinel-1 升轨数据、54 景 Sentinel-1 降轨数据和 6 景 ALOS-2 PALSAR-2 升轨数据,相关数据具体参数如表 1 所示。采用覆盖实验区的 30 m 空间分辨率的

AW3D30 数字表面模型(digital surface model, DSM)作为参考高程数据,用于辅助去除地形相位。

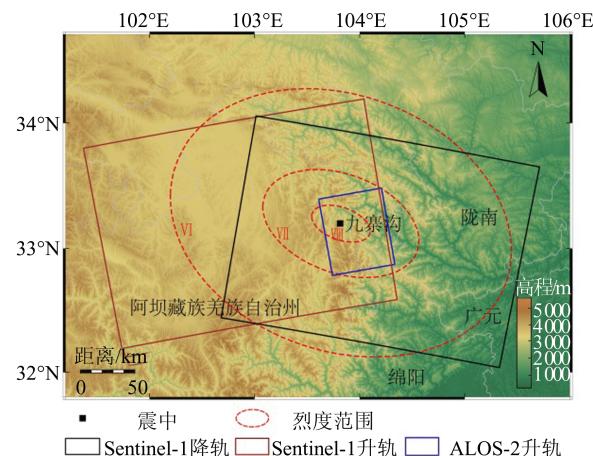


图 1 九寨沟地震烈度和多源 SAR 数据覆盖范围

Fig.1 Intensity of Jiuzhaigou Earthquake and Coverage of SAR Data

根据不同 SAR 数据的特点,本文采用组合策略进行滑坡隐患探测识别与形变监测。首先,利用 L 波段的 ALOS-2 PALSAR-2 数据进行常规 DInSAR 处理,L 波段波长较长,可以有效抑制植被引起的去相干,对研究区域进行快速滑坡灾害隐患普查;然后,利用 C 波段的 Sentinel-1 数据进行时间序列 InSAR 处理,适合于对研究区域的滑坡隐患开展精细详查,同时长时间序列 InSAR 分析也能探测到常规 DInSAR 难以识别的缓慢变形滑坡。

采用 3 种数据集(ALOS-2 PALSAR-2 数据、Sentinel-1 升降轨数据)组合和两种技术手段(常规 DInSAR、时间序列 InSAR)联合的处理策略,可实现对九寨沟地区震后潜在滑坡隐患的准确识别与监测。

3 九寨沟震后滑坡灾害隐患分布概况

通过联合常规 DInSAR 技术快速普查和时序 InSAR 技术精细详查的滑坡隐患识别策略,本文在九寨沟地区总计探测识别到 13 处滑坡隐患,对这 13 处滑坡隐患进行编号(L_1 ~ L_{13}),具体位置分布见图 2,表 2 列出了各滑坡隐患的相关特征信息。

从地理位置来看,滑坡隐患主要集中分布于漳扎镇周围,其中 7 处毗邻居民区,对当地人民群众生命财产安全构成直接威胁;2 处位于九寨沟

景区重要景点,对景区自然景观恢复与重建具有重要影响;其余4处属于山体高位滑坡,主要是由于高位山体垮塌形成的沉积碎屑滑动。从滑动方向来看,主要为自西向东(8处)或自西北向东南(4处),只有 L_{13} 滑坡位于北坡自北向南滑动,这一现象与文献[22]的结论相符合。2017年九

寨沟地震属于右旋走滑地震,本文探测识别到的滑坡隐患基本都位于向东运动的东北盘(L_{12} 滑坡除外),受地震波传播方向的影响,东、东南向是地震滑坡较易发生的坡向。从滑坡后缘位置高程来看,主要分布在2200~2600 m区间,此外4处滑坡高程均超过3000 m。

表1 SAR数据集基本参数表

Tab.1 Basic Parameters of SAR Datasets

卫星数据源	轨道方向	波段	中心入射角/(°)	分辨率 (方位向×距离向)	时间跨度	影像数量
Sentinel-1	升轨	C	43.9	13.92 m×2.32 m	2017-08—2019-06	58
Sentinel-1	降轨	C	39.3	13.95 m×2.32 m	2017-08—2019-06	54
ALOS-2 PALSAR-2	升轨	L	39.7	2.21 m×1.43 m	2018-09—2019-03	6

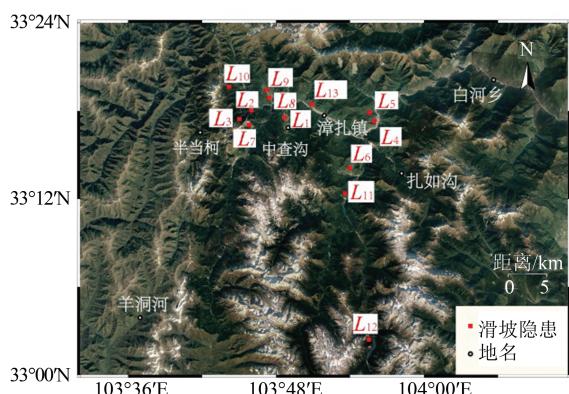


图2 九寨沟地区震后滑坡隐患分布图

Fig.2 Distribution Map of Landslides in Jiuzhaigou

为了验证InSAR技术识别潜在滑坡隐患的准确性与可靠性,联合四川省第二测绘地理信息工程院、四川地矿局405地质队等单位于2019年11月7日至9日对该地区进行了实地考察。结果表明,除4处滑坡隐患(L_2 、 L_3 、 L_7 、 L_{10})由于地处高位视线受阻或林木密布道路不通无法实地考察外,其余从InSAR处理结果识别出的潜在滑坡隐患均具有显著的空间分布特征,对于重点滑坡隐患如 L_1 、 L_4 、 L_5 、 L_6 等,均发现了明显的地面拉裂缝或错台等现象。实地考察核实验证了本文联合采用常规DInSAR快速普查、时序InSAR精细详查的滑坡隐患识别策略的有效性与可靠性,表明了InSAR技术在大范围滑坡灾害隐患识别与监测中的应用潜力。

4 重点滑坡隐患分析

根据前文对九寨沟地区已探测的13处滑坡隐患分析,通过实地调查验证,进一步结合滑坡

隐患的位置、地形、地质条件等因素,选取了其中潜在威胁最大的2处隐患作为重点进行详细分析。

4.1 中查沟滑坡隐患

中查沟滑坡位于九寨沟县漳扎镇西南方的中查沟西侧,面积约0.96 km²,滑向为自西向东,目前该滑坡体上有一家丽斯卡尔顿酒店在建,沟对面为波日俄村。图3展示了2018年获取的一对ALOS-2 PALSAR-2数据处理得到的差分干涉测量结果。图3中,形变量为负值表示地物位移远离卫星方向,正值表示位移靠近卫星方向。根据形变分布结合实地考察发现,该滑坡可从空间上划分成A、B、C共3个部分,从形变测量结果中可以观察到A区有明显的相位变化,2个月内雷达视线向形变量高达12 cm,B、C区域形变相对A区较小,约2~3 cm。

为了进一步查明该滑坡的运动演化情况,利用震后2018-08—2019-06期间的Sentinel-1升降轨数据进行时序InSAR处理,得到震后雷达视线向形变空间分布(见图4)。结合地形特征和实地考察发现,C区为滑源区域,被茂密植被覆盖(见图5(a)),表面以泥沙为主,质地疏松,未观察到明显后缘拉裂缝或错台,最大形变速率约为6.3 cm/a(升轨视线向)。B区主要为酒店建筑区,最大形变速率约为7.1 cm/a(升轨视线向),且形变速率呈现明显的空间差异,受后方C区推挤产生滑动,地表道路出现多处由滑坡持续变形造成的裂缝(图5(b)、5(c))。A区为整个滑坡形变量级最大的区域,约为8.9 cm/a(升轨视线向),该区域主要为施工相关的建筑废料堆积区,堆放着大量建筑垃圾及废弃渣土(图5(d)),一方面增加了该

区域的重力荷载,另一方面,松散堆积的建筑垃圾不断压实固结的过程也表现出持续形变信号。

表 2 基于 InSAR 技术识别的滑坡隐患基本特征信息
Tab.2 Basic Characteristics of Landslides Detected by InSAR

滑坡编号	滑坡名称	经、纬度	面积/km ²	高程/m	滑动方向	可探测数据	可探测方式
L_1	中查沟滑坡	103°48'40.19"E, 33°17'28.75"N	0.96	2 492	自西向东	P/S-a/S-d	DInSAR 时序 InSAR
L_2	杀务一号滑坡	103°46'9.91"E, 33°18'5.77"N	0.13	2 643	自西向东	P	DInSAR
L_3	杀务二号滑坡	103°44'54.01"E, 33°17'49.83"N	0.13	3 348	自西向东	P	DInSAR
L_4	隆康社区滑坡	103°56'1.99"E, 33°17'20.15"N	0.34	2 092	自西向东	P/S-a/S-d	DInSAR 时序 InSAR
L_5	从牙村滑坡	103°55'48.59"E, 33°17'57.94"N	0.19	2 202	自西向东	P/S-a/S-d	DInSAR 时序 InSAR
L_6	盘亚寨滑坡	103°53'55.72"E, 33°14'9.80"N	0.41	2 562	西北向东南	P/S-a/S-d	DInSAR 时序 InSAR
L_7	如意坝滑坡	103°45'46.19"E, 33°17'10.86"N	0.17	3 237	西北向东南	S-a	时序 InSAR
L_8	上四寨滑坡	103°47'31.56"E, 33°18'42.36"N	0.09	2 349	自西向东	S-a/S-d	时序 InSAR
L_9	喇嘛岗滑坡	103°47'17.45"E, 33°19'13.58"N	0.03	2 481	西北向东南	S-a/S-d	时序 InSAR
L_{10}	杀务三号滑坡	103°44'9.22"E, 33°19'37.56"N	0.03	3 334	西北向东南	S-a	时序 InSAR
L_{11}	芦苇海滑坡	103°54'5.68"E, 33°12'55.60"N	0.05	2 275	自西向东	P	DInSAR
L_{12}	长海子滑坡	103°55'38.57"E, 33°2'26.04"N	0.07	3 272	自西向东	P	DInSAR
L_{13}	漳扎村滑坡	103°50'54.55"E, 33°18'27.76"N	0.21	2 339	自北向南	S-d	时序 InSAR

注:P 表示 ALOS-2 PALSAR-2 数据; S-a、S-d 分别表示 Sentinel-1 升、降轨数据

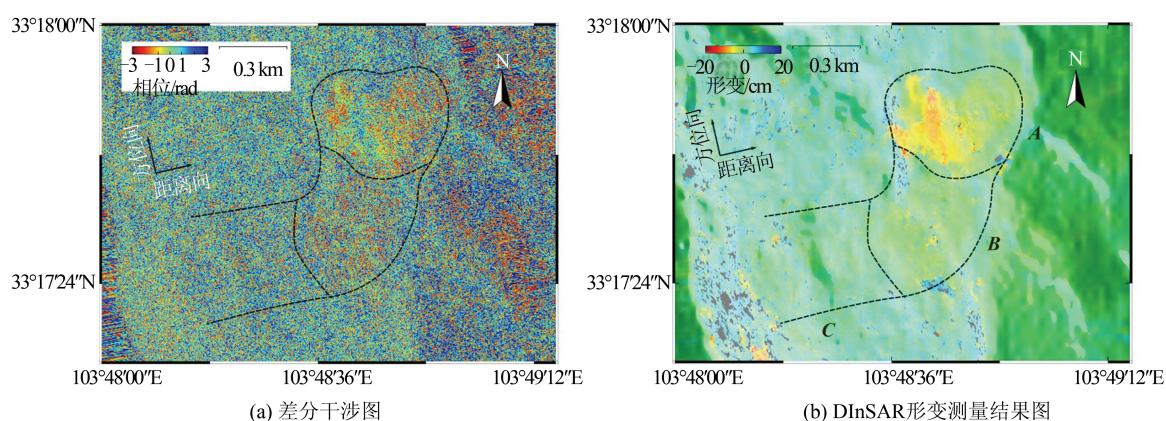


图 3 中查沟滑坡 ALOS-2 PALSAR-2 升轨数据 DInSAR 测量结果

Fig 3 DInSAR Results of Zhongchagou Landslide Using ALOS-2 PALSAR-2 Ascending Data Pair

从中查沟滑坡表面选取点 1(A 区)和点 2(B 区)这两个代表性点位进行形变时序分析,如图 6 所示。结果表明,A 区整体呈线性形变趋势,松散

堆积自震后以来处于持续不稳定状态,且目前酒店仍在建设中,后续可能会持续进行堆填操作;B 区在震后开始表现为快速线性形变,进入 2018 年

1月后形变速率明显降低,在B、C区域之间修建有挡墙等滑坡防治设施(图5(a)),一定程度上加固了该区域,因此呈现逐渐稳定趋势。

整体而言,中查沟滑坡隐患整体处于蠕滑运

动中,特别是A区建筑废料堆积处,仍然处于持续线性形变状态,B、C区域虽逐渐趋于稳定,但不排除在其他外在因素(如降雨、地震)影响下进一步加速下滑的可能。

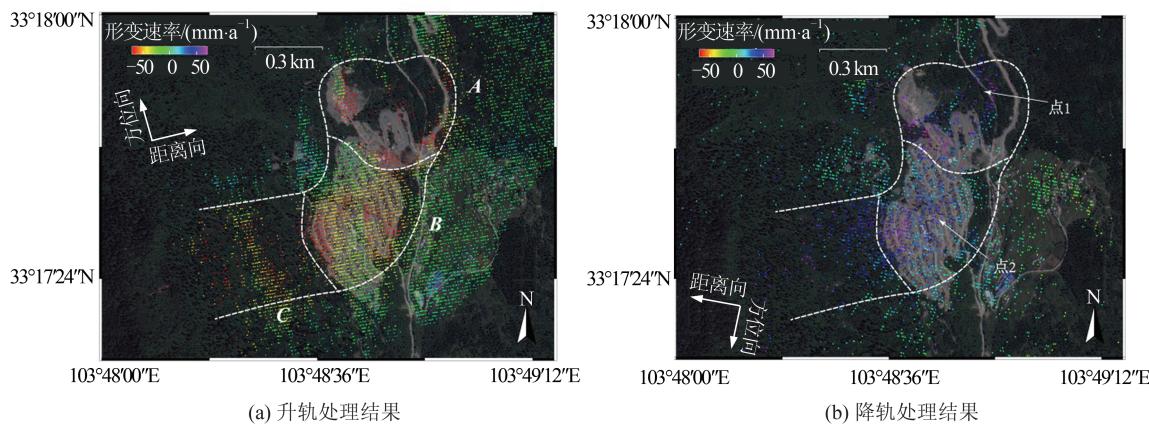


图4 中查沟滑坡隐患 Sentinel-1 数据视线向平均形变速率图

Fig.4 Annual Mean LOS Displacement Velocity of Zhongchagou Landslide Retrieved from Sentinel-1 Data

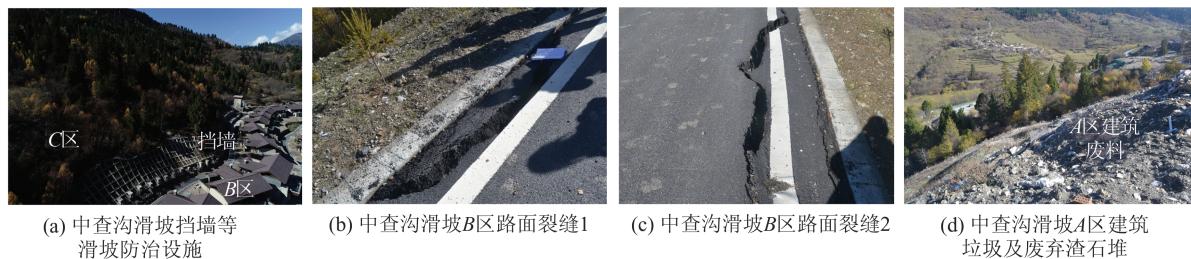


图5 中查沟滑坡实地考察照片

Fig.5 In-situ Photos of Zhongchagou Landslide

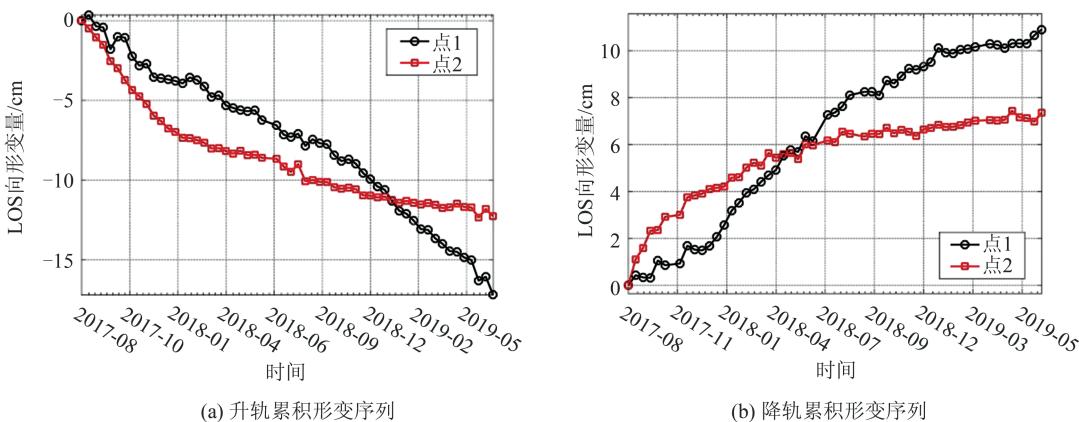


图6 中查沟滑坡 Sentinel-1 数据视线向累积形变曲线

Fig.6 Cumulative LOS Displacements of Zhongchagou Landslide Retrieved from Sentinel-1 Data

4.2 盘亚寨滑坡隐患

盘亚寨滑坡隐患位于九寨沟景区内的荷叶社区盘亚寨,面积约 0.41 km^2 ,主滑动方向为自西北向东南。盘亚寨整体位于滑坡体中部,地震后该村庄遭到严重损坏,多处房屋受损,部分当地居民随后迁离至山脚居住,但目前仍有部分村民居住在村庄里,直接受到该滑坡威胁。该滑坡属

于在2017年九寨沟地震以前已经存在的古滑坡,地震引起山体松动,进一步导致该滑坡在震后加速下滑。

图7展示了2018年一对ALOS-2 PALSAR-2数据的DInSAR测量结果,结果表明该滑坡中上区域形变明显,最大约为4 cm,滑坡下部形变量级相对较小。

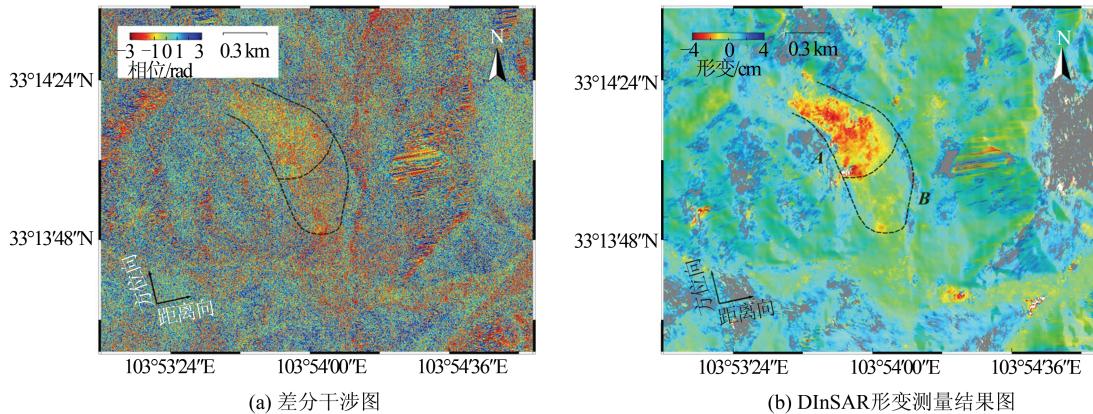


图 7 盘亚寨滑坡 ALOS-2 PALSAR-2 升轨数据 DInSAR 测量结果

Fig. 7 DInSAR Results of Panyazhai Landslide Using ALOS-2 PALSAR-2 Ascending Data Pair

进一步利用震后 Sentinel-1 升降轨数据进行时序 InSAR 分析发现,该滑坡形变速率存在明显的空间差异(见图 8),将其分为 A、B 两个区域。A 区为滑坡上部区域,盘亚寨整体位于 A 区,此外还有一条公路贯穿 A 区,滑坡顶部主要为山体,有植被覆盖。

从升轨 Sentinel-1 探测得到视线向形变速率

来看,A 区域形变明显,最大形变速率为 11.5 cm/a;B 区位于盘亚寨南侧下方,形变速率相对较小,约为 3.1 cm/a。从形变时间维变化情况来看,滑坡上部 A 区形变速率变化较小,接近线性形变,滑坡下部 B 区在 2017-08—2018-10 期间形变速率较为稳定,2018 年 10 月以后形变有逐渐减缓现象(见图 9)。

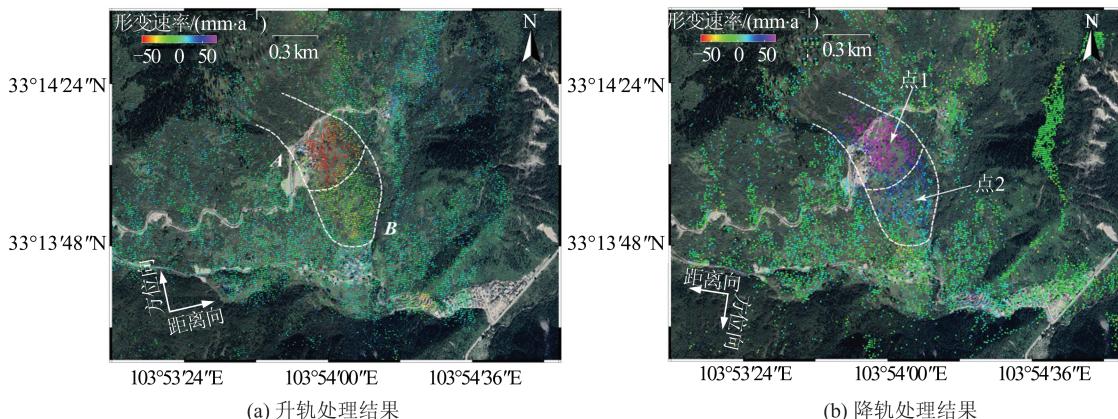


图 8 盘亚寨滑坡隐患 Sentinel-1 数据视线向平均形变速率图

Fig.8 Annual Mean LOS Displacement Velocity of Panyazhai Landslide Retrieved from Sentinel-1 Data

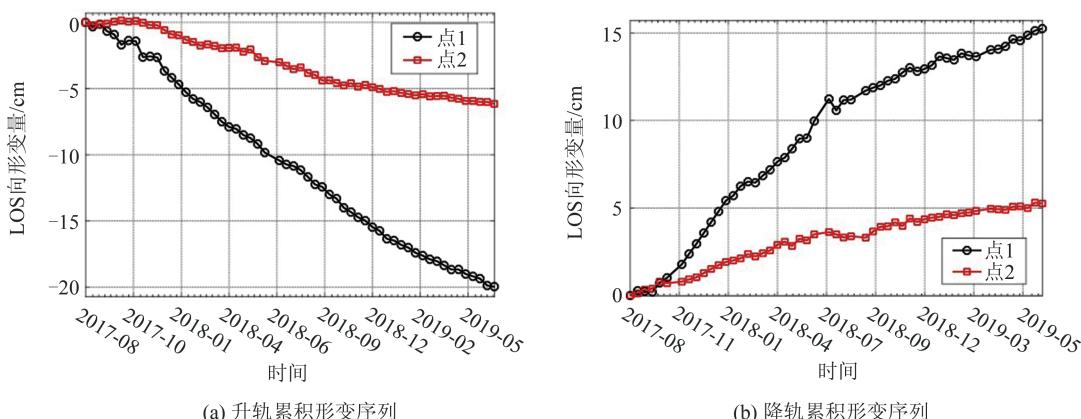


图 9 盘亚寨滑坡 Sentinel-1 数据视线向累积形变曲线

Fig.9 Cumulative LOS Displacements of Panyazhai Landslide Retrieved from Sentinel-1 Data

通过实地考察发现,盘亚寨滑坡主要由泥质沉积物与岩石组成,顶部及盘亚寨北部山体有大量错台出现,滑坡后缘裂缝出露(图10(a));同时盘亚寨内多处房屋及地面有裂缝痕迹,滑坡中段出现大量错台(图10(b)),实地考察结果与InSAR监测结果高度吻合。



图10 盘亚寨滑坡实地考察照片

Fig 10 In-situ Photos of Panyazhai Landslide

5 结语

2017年九寨沟地震对该地区生态环境和基础设施等造成了严重破坏,诱发形成了大量的山体崩塌、滑坡等次生灾害。本文利用InSAR技术手段对九寨沟地区震后潜在滑坡隐患开展早期探测识别工作,共识别出滑坡隐患13处,其中7处毗邻居民区,对当地人民生命财产安全构成直接威胁;选取其中潜在威胁最大的2处隐患作为重点进行了进一步的详细分析,获取了滑坡隐患沿时间维的形变演变情况,为后续滑坡灾害治理提供了信息支撑。实地野外调查验证了基于InSAR技术的滑坡隐患识别结果具有较高的可靠性,说明利用InSAR技术在复杂山区开展滑坡隐患早期识别具备可行性和有效性。

1) 地震不仅会造成大量同震崩塌与滑坡,还会造成山体震裂松动,为震后滑坡的形成发育创造条件,传统光学遥感手段难以探测发现这类缓慢变形中的潜在滑坡隐患,InSAR技术可以捕获滑坡的微小形变信号,因而可实现对这类滑坡隐患的早期探测识别。

2) 在复杂山区直接利用时序InSAR技术开展大范围滑坡隐患探测目前仍然存在一定挑战,效率低,结果不稳定。采用联合常规DInSAR快速普查和时序InSAR精细详查的层次化滑坡隐患识别策略,既兼顾效率又可以实现对重点区域的精准详查。

参考文献

- [1] Shan Xinjian, Qu Chunyan, Gong Wenyu, et al. Coseismic Deformation of the Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake from Sentinel-A InSAR Data and Fault Slip Inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12):4 527-4 536(单新建, 齐春燕, 龚文瑜, 等. 2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震InSAR同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12):4 527-4 536)

- [2] Zhang Lingxin, Zhu Baijie, Tao Zhengru, et al. Field Investigation and Failure Characteristics of Building Damaged by the 7.0-Magnitude Earthquake in Jiuzhaigou [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41(4): 1 053-1 059(张令心, 朱柏洁, 陶正如, 等. 九寨沟7.0级地震房屋震害现场调查及其破坏特征[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 1 053-1 059)
- [3] Xu Chong, Wang Shiyuan, Xu Xiwei, et al. A Panorama of Landslides Triggered by the 8 August 2017 Jiuzhaigou, Sichuan Ms 7.0 Earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(1):232-260(许冲, 王世元, 徐锡伟, 等. 2017年8月8日四川省九寨沟Ms 7.0地震触发滑坡全景[J]. 地震地质, 2018, 40(1): 232-260)
- [4] Li Z, Shi W, Lu P, et al. Landslide Mapping from Aerial Photographs Using Change Detection-Based Markov Random Field[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 76-90
- [5] Guzzetti F, Mondini A C, Cardinali M, et al. Landslide Inventory Maps: New Tools for an Old Problem[J]. *Earth Science Reviews*, 2012, 112(1/2): 42-66
- [6] Behling R, Roessner S, Golovko D, et al. Derivation of Long-Term Spatiotemporal Landslide Activity: A Multi-sensor Time Series Approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 88-104
- [7] Fan X, Scaringi G, Xu Q, et al. Coseismic Landslides Triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou Earthquake (Sichuan, China): Factors Controlling Their Spatial Distribution and Implications for the Seismogenic Blind Fault Identification [J]. *Landslides*, 2018, 15: 967-983
- [8] Li Qiang, Zhang Jingfa. Investigation on Earthquake-Induced Landslide in Jiuzhaigou Using Fully Polarimetric GF-3 SAR Images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 23(5): 883-891(李强, 张景发. 高分三号卫星全极化SAR影像九寨沟地震滑坡普查[J]. 遥感学报, 2017, 23(5):883-891)
- [9] Dong Xiujun, Xu Qiang, She Jinxing, et al. Preliminary Study on Interpretation of Geological Hazards Based on Multi-source Remote Sensing Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 432-441(董秀军, 许强, 余金

- 星,等. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3):432-441)
- [10] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry:A Case Study of Danba, Sichuan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2 039-2 049(张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2 039-2 049)
- [11] Ao Meng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. An Improved CR-InSAR Technology Used for Deformation Monitoring in Jiaju Landslide, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3):377-383(敖萌, 张勤, 赵超英, 等. 改正 CR-InSAR 技术用于四川甲居滑坡形变监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42 (3): 377-383)
- [12] Zhao Chaoying, Kang Ya, Zhang Qin, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7):993-1 013
- [13] Shi Xuguo, Zhang Lu, Xu Qiang, et al. Monitoring Slope Displacements of Loess Terrace Using Time Series InSAR Analysis Technique [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7):1 027-1 034(史绪国, 张路, 许强, 等. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44 (7) : 1 027-1 034)
- [14] Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, Zhang Qing, et al. Research on Loess Landslide Identification, Monitoring and Failure Mode with InSAR Technique in Heifangtai, Gansu [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7):996-1 007(赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7):996-1 007)
- [15] Li M, Zhang L, Shi X, et al. Monitoring Active Motion of the Guobu Landslide Near the Laxiwa Hydropower Station in China by Time-Series Point-like Targets Offset Tracking[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 80-93
- [16] Lu Huiyan, Li Weile, Xu Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1 342-1 354(陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(9): 1 342-1 354)
- [17] Shi Xuguo, Liao Mingsheng, Li Menghua, et al. Wide-Area Landslide Deformation Mapping with Multi-path ALOS PALSAR Data Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2):136-150
- [18] Rosen P A , Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3):333-382
- [19] Liao Mingsheng, Wang Teng. Time Series InSAR Technology and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2014(廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014)
- [20] Li Zhenghong, Song Chuang, Yu chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967-979(李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7): 967-979)
- [21] Ferretti A, Prati C, Rocca F, et al. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2 202-2 212
- [22] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2 375-2 383
- [23] Hooper A. A Multi-temporal InSAR Method Incorporating both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches [J]. *Geophysical Research Letter*, 2008, 35(16): 1-5
- [24] Wu Weiying, Wang Xiaoqing, Deng Fei. Compilation and Spatial Analysis of Co-seismic Landslide Inventory by Using High-Resolution Remote Sensing Images in Earthquake Emergency Response: An Example of the Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake on August 8, 2017 [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(4):815-825(吴玮莹, 王晓青, 邓飞. 基于高分卫星遥感影像的地震应急滑坡编目与分布特征探讨——以 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震为例[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(4): 815-825)

Detection and Monitoring of Post-Earthquake Landslides in Jiuzhaigou Using Radar Remote Sensing

CAI Jiehua¹ ZHANG Lu¹ DONG Jie² DONG Xiujun³ LIAO Mingsheng¹ XU Qiang³

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

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

Abstract: Objectives: On 8th August 2017, a catastrophic earthquake of Ms 7.0 struck the County of Jiuzhaigou in Sichuan Province, China. Because of its high magnitude and shallow epicenter, the earthquake caused grave casualties and property losses. Furthermore, the earthquake triggered numerous secondary mountain disasters such as rockfall and landslide. We use the synthetic aperture radar interferometry (InSAR) technique to detect post-earthquake landslides in Jiuzhaigou area. Methods: Firstly, we carry out a quick detection across wide area using differential InSAR (DInSAR) technique with 6 ALOS-2 PALSAR-2 ascending images. DInSAR technique can observe the subtle deformation of landslide surface during the period between two SAR observations, so the active deforming landslides can be efficiently distinguished from stable areas. Nevertheless, the performance of DInSAR is often limited by temporal and spatial decorrelations induced by dense vegetation coverage, etc. To retrieve the temporal evolution of these landslides, detailed monitoring of specific landslides is carried out using time-series InSAR technique with 112 Sentinel-1 ascending and descending images. Time-series InSAR technique can overcome the limitation of traditional DInSAR technique in spatial-temporal decorrelation, and improve the deformation measurement accuracy. Therefore, the combination of DInSAR and time-series InSAR is adopted to accurately monitor single landslide, and efficiently detect landslides in Jiuzhaigou area. Results: The results show that there are 13 landslides that can be detected by InSAR analyses in Jiuzhaigou area, including 7 landslides close to residential areas. The time series displacements retrieved indicate that several landslides have long-term linear deformations after the 2017 earthquake. These landslides severely threaten people's life and property and need to be monitored regularly. Finally, the reliability of detection results based on InSAR technology is verified by a field survey. Conclusions: The results can provide key supports for the geohazard mitigation and prevention in the Jiuzhaigou scenic area. We indicate that a strategy which combines DInSAR technique with time-series InSAR can efficiently and accurately detect and monitor landslides over a wide area.

Key words: Jiuzhaigou; landslide hazard; early detection; differential synthetic aperture radar interferometry; time-series synthetic aperture radar interferometry; deformation monitoring

First author: CAI Jiehua, PhD candidate, specializes in InSAR for geohazard monitoring. E-mail: caijiehua@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Lu, PhD, professor. E-mail: luzhang@whu.edu.cn

Foundation support: The Key Research and Development Program of the Department of Science and Technology of Sichuan Province (2019YFS0074); Land and Resources Research Program of Sichuan Province (KJ-2018-21); the National Natural Science Foundation of China (41774006, 41904001, 41790445).

引文格式: CAI Jiehua, ZHANG Lu, DONG Jie, et al. Detection and Monitoring of Post-Earthquake Landslides in Jiuzhaigou Using Radar Remote Sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11):1707-1716. DOI:10.13203/j.whugis20200263(蔡杰华,张路,董杰,等.九寨沟震后滑坡隐患雷达遥感早期识别与形变监测[J].武汉大学学报·信息科学版,2020,45(11):1707-1716.DOI:10.13203/j.whugis20200263)