

# Study on the Application Prospect of DS-InSAR Technology in Landslide Deformation Monitoring in Complex and Dangerous Mountainous Areas

Mu He, Youbing Zhao

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan  
Email: 317276592@qq.com

Received: Jun. 10<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 1<sup>st</sup>, 2020

---

## Abstract

Distributed scatter InSAR (DS-InSAR) not only has the advantage of large scope of observation and high degree of automation in traditional InSAR technology, but also can increase the coherence point density of time series InSAR in complex and dangerous mountainous areas. Therefore, it could be used into landslide deformation monitoring. This paper used Sentinel-1A ascending images covering some areas of Kangding city as the experiment data. DS points located in debris and bare soil slope area were extracted by applying KS statistical test method and adaptive filtering. And then landslide deformation analysis is carried out. The result shows that the average annual subsidence velocity of the landslide area is about 10.9 mm/y and the maximum settlement is 21.0 mm. The large subsidence period is mainly concentrated from May to August each year, which coincides with the time of concentrated rainfall in this area. Experiment shows that DS-InSAR technology has important reference value for landslide deformation monitoring of complex and dangerous mountain area.

## Keywords

Complex and Dangerous Mountainous Areas, Landslide Deformation Monitoring, DS-InSAR Technology, KS Statistical Test Method

---

# DS-InSAR技术在复杂艰险山区滑坡形变监测中的应用前景研究

何 沐, 赵有兵

中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都

---

Email: 317276592@qq.com

收稿日期: 2020年6月10日; 录用日期: 2020年6月24日; 发布日期: 2020年7月1日

---

## 摘要

分布式目标雷达干涉(DS-InSAR)技术既继承了传统InSAR技术观测范围广、自动化程度高等技术优势, 又能提高复杂艰险山区时序InSAR相干点密度, 可应用于滑坡形变监测。本文利用覆盖康定附近的Sentinel-1A升轨影像, 基于KS统计检验方法和自适应滤波, 提取出了位于岩屑区、裸露土坡的DS点, 并进行滑坡形变分析, 实验结果为: 该滑坡区域在2017年3月~2018年10月的监测时间内, 年平均沉降速率约为10.9 mm/y, 最大沉降量达到21.0 mm; 且发生较大沉降时间段主要集中于每年5~8月, 与该区域集中降雨时间相符。实验表明DS-InSAR技术对复杂艰险山区进行滑坡形变监测具有重要的参考价值。

## 关键词

复杂艰险山区, 滑坡形变监测, DS-InSAR技术, KS统计检验方法

---

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

复杂艰险山区山高谷深, 地层岩性复杂多变, 地质构造复杂、深大断裂发育, 新构造运动活跃、地震频繁强烈, 气候恶劣多变, 致使内、外动力地质作用十分强烈, 具有“显著的地形高差”、“强烈的板块活动”、“频发的山地灾害”、“脆弱的生态环境”等四大特点。在复杂艰险山区工程施工要面对极端艰险复杂的地形与地质环境, 高原地区频发的地震、滑坡、泥石流等山地灾害给重点工程建设及后续运营造成巨大安全风险, 本文就 DS-InSAR 技术在复杂艰险山区滑坡形变监测的应用前景开展相关研究工作。

卫星合成孔径雷达干涉(InSAR)技术具有观测范围广、自动化程度高等技术优点, 已被证明是滑坡监测的有效手段[1] [2]。在其基础上发展起来的永久散射体雷达干涉测量(Persistent Scatterer InSAR, PSI)技术受时空失相干和噪声影响较小, 能够为形变场提供可靠的观测结果[3]。但 PSI 技术只针对永久散射体点目标(如房屋、铁塔等人工建筑物)进行分析, 在复杂艰险山区进行滑坡形变监测时, 人工建筑物稀少, PS 点几乎没有[4]。除永久散射体以外, 还存在地物性质较为一致且在一定时间内保持稳定的散射体(即分布式散射体, DS 点), 能为复杂艰险山区 InSAR 形变监测提供更丰富的信息。本文引入 DS-InSAR 技术, 开展复杂艰险山区滑坡形变监测, 对岩屑区和裸露土坡进行分析, 识别出分布式散射体(Distributed Scatter, DS 点), 增加用于形变监测的点目标数量, 提高滑坡形变监测结果的可信度。

## 2. 技术路线

在 PS-InSAR 技术的基础上, 基于点目标的时间序列分析(IPTA)、相干点时域分析(TCP InSAR)等技术的提出, 进一步推动时序 InSAR 技术的发展[5] [6]。然而, 对于 PS 点目标稀少的区域, 这些算法均无法起到形变监测的作用。尤其是川藏铁路沿线山高谷深, 引起侧视成像雷达阴影和叠掩, 可识别的 PS

点几乎没有, 致使 PSI 技术滑坡形变监测结果空间分辨率低, 相位解缠效果差[7]。Ferretti 等学者于 2011 年提出了 SqueeSAR 技术, 以分析识别 DS 点, 来增加自然地表的点目标数量。SqueeSAR 技术利用 KS 算法探测出分布式散射体, 再进行建模解算和位移提取, 并通过对山区 SAR 数据进行 SqueeSAR 实验证明了其有效性。为提高川藏地区滑坡识别和位移监测的能力, 本文引入分布式散射体(如岩屑区、裸露土坡等)的识别分析, 具体的 DS 点提取流程如图 1 所示。

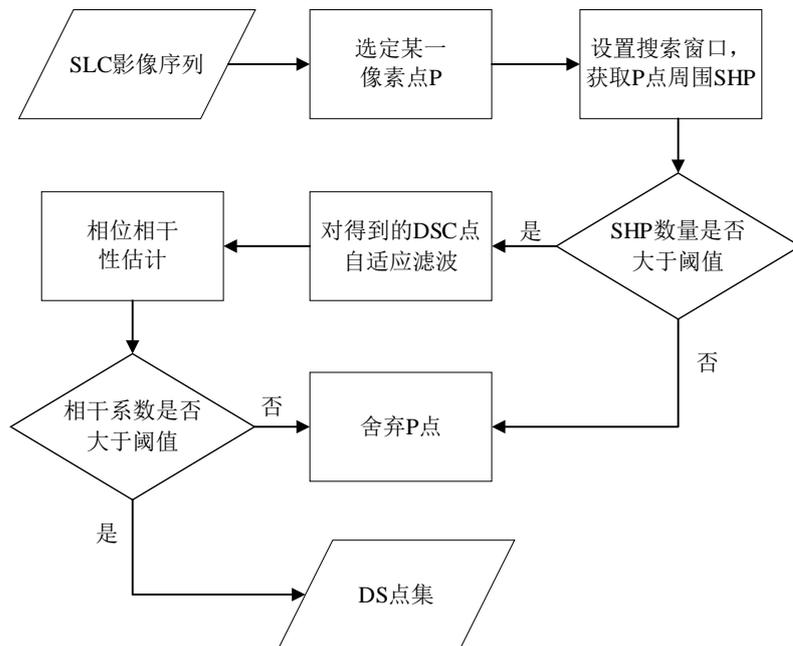


Figure 1. The flow chart of extracting DS points  
图 1. DS 点提取流程

探测 DS 点时, 采用 KS 检验方法为每个像素点确定统计同质点(Statistical Homogeneity Point, SHP) [8]。如果一个像素点的统计同质点大于所设阈值, 则将其定义为 DS 备选点(DSC)。对 DSC 进行自适应滤波, 逐点恢复相位时间序列, 提高 DSC 点的相干性。通过计算相干系数从 DSC 点集中筛选出真正的 DS 点, 得到较高空间密度的形变场。

KS 检验基于通用分布的拟合优度检验方法, 采用经验分布函数确定两像素之间是否具有 consistency [9]。设总体分布 F 的独立同分布样本为  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , 其经验分布函数为:

$$F_N(z) = \begin{cases} 0, & x < X_{(1)} \\ \frac{k}{N}, & X_{(k)} \leq x \leq X_{(k+1)}, k = 1, \dots, N-1 \\ 1, & X_{(N)} \leq x \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(k)}$  为从小到大重新排序后得到的序列。

对于两个不同的像素点而言, 判断其振幅一致性所对应的零假设和备选假设为:

$$H_0 : F_N^i(z) \equiv F_N^j(z) \leftrightarrow H_1 : F_N^i(z) \neq F_N^j(z) \quad (2)$$

式中,  $F_N^i(z)$  和  $F_N^j(z)$  分别代表两个不同像素点  $i$  和  $j$  的经验分布函数。

Ferretti 等通过引入柯尔莫哥洛夫距离  $D_N$  进行上述假设检验:

$$D_N = \sqrt{\frac{N}{2}} \sup_i |F_N^i(z) - F_N^j(z)| \quad (3)$$

式中  $D_N$  的累积概率密度函数为:

$$P(D_N \leq t) = H(t) = 1 - 2 \sum_{N=1}^{\infty} (-1)^{N-1} \cdot e^{-2 \cdot N^2 \cdot t^2} \quad (4)$$

所对应显著性水平  $\alpha$  为:

$$\alpha = 1 - H(t) \quad (5)$$

一般情况下, 取拒绝域为 0.05, 当统计检验量大于 0.05 时, 接受零假设, 两个不同像素点  $i$  和  $j$  分布相同, 为一对 SHP; 当统计检验量小于 0.05 时, 接受备选假设, 认为两点不是一对 SHP。

确定了点  $P$  的 SHP 之后, 即可判定此点是否为 DSC。判定过程中需设定 SHP 的数目阈值, SHP 数目大于给定阈值才是 DSC。对影像进行逐点分析之后, 即可得到全部的 DSC。然后对影像进行自适应滤波, 提高 DSC 点的相干性。滤波的本质, 是针对备选点进行逐点计算, 提高备选点的相干性, 同时提供非常好的可视化效果, 去除了影像中大部分斑点噪声。依次计算每个 DS 备选点的相干系数值, 并设定经验相干性阈值, 判断相干性较高的 DSC 为 DS 点。

得到所需 DS 点集后, 采用分步三维解缠算法进行相位解缠, 即可获取 DS 点相位时间序列[10]。相位解缠后, 把除形变相位外的其他相位成分都归为形变提取的残余误差项。为了最终得到形变相位, 需要先扣除相位值中的残差项。残差项可以分为空间相关与空间非相关部分。其中, 残差项空间非相关部分可以被当作噪声, 通过空间域低通滤波的方法扣除; 对于残差项空间相关部分可以通过最小二乘迭代的方法和先时间域高通滤波、再空间域的低通滤波的方法扣除。最后, 将 DS 点形变相位转化为 DS 点形变时间序列[11] [12]。

### 3. 实验分析

实验利用覆盖康定附近复杂艰险山区的 Sentinel-1A 升轨影像数据, 影像获取时间为 2017 年 3 月 13 日至 2018 年 11 月 15 日, 使用合适的参数生成干涉影像集合, 采用 KS 统计检验方法提取 DS 点集, 使用分步三维相位解缠方法进行时空相位解缠, 进而提取形变时间序列。经实验分析, 发现朋布西乡存在滑坡隐患灾害点。

朋布西乡是四川省甘孜藏族自治州康定市辖乡, 位于康定西南部, 管辖面积 4236 平方公里, 人口 0.3 万, S215 省道经此辖域, 是道孚前往塔公草原的重要路段。实验选用覆盖朋布西乡的 49 景 Sentinel-1A 升轨影像(雷达波长 5.6 cm, 多视处理后影像空间分辨率 30 m), 影像数据基本信息如表 1 所示。

**Table 1.** Image information

**表 1.** 影像基本信息

序号	成像日期	时间间隔 T/d	序号	成像日期	时间间隔 T/d
1	20170313	-300	26	20180107	0
2	20170325	-288	27	20180119	12
3	20170406	-276	28	20180131	24
4	20170418	-264	29	20180212	36
5	20170430	-252	30	20180224	48
6	20170512	-240	31	20180308	60
7	20170524	-228	32	20180320	72

Continued

8	20170605	-216	33	20180401	84
9	20170617	-204	34	20180425	96
10	20170629	-192	35	20180507	108
11	20170711	-180	36	20180519	120
12	20170723	-168	37	20180531	132
13	20170804	-156	38	20180612	144
14	20170816	-144	39	20180624	156
15	20170828	-132	40	20180718	168
16	20170909	-120	41	20180730	180
17	20170921	-108	42	20180823	192
18	20171003	-96	43	20180904	204
19	20171015	-84	44	20180916	216
20	20171027	-72	45	20180928	228
21	20171108	-60	46	20181010	240
22	20171120	-48	47	20181022	252
23	20171202	-36	48	20181103	264
24	20171214	-24	49	20181115	276
25	20171226	-12			

通过进行 SLC 影像的生成、轨道校正、配准及裁剪等预处理工作, 裁剪后的影像覆盖范围如图 2 所示, 实验影像覆盖范围  $31.2 \times 14.3 \text{ km}^2$ 。该区域山高谷深, 有植被覆盖, 使用 DS-InSAR 技术增加滑坡监测相干点数量, 提高大面积区域滑坡隐患点探测的成功率。

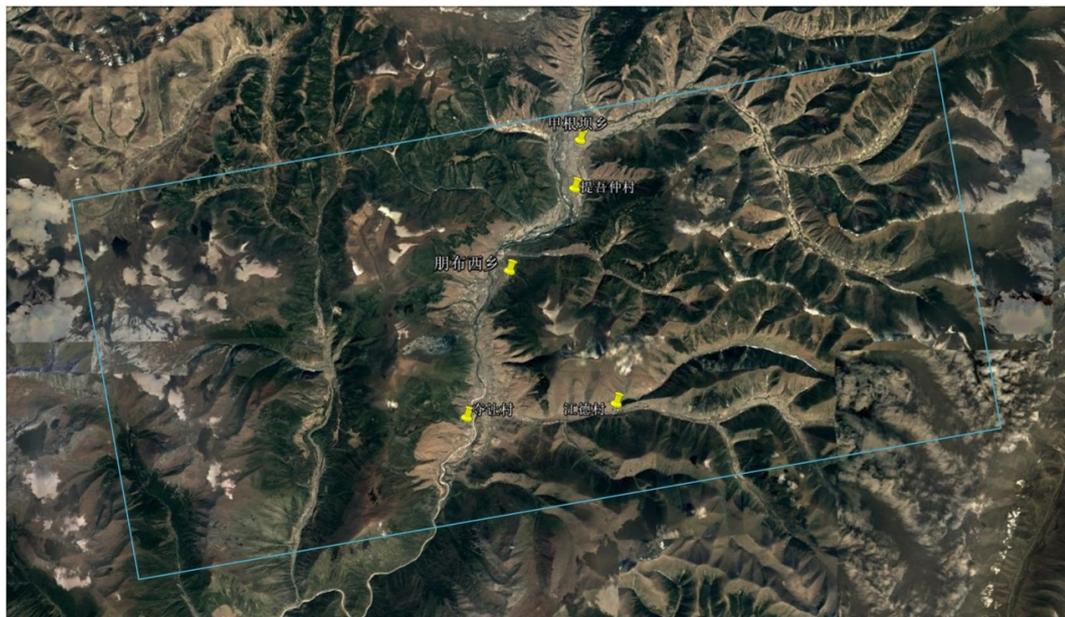


Figure 2. Image coverage area  
图 2. 实验影像覆盖区域

以 2018 年 1 月 7 日影像为主影像, 将其余 48 景影像一一与主影像干涉, 生成 48 组干涉对, 时空基线图如图 3 所示。选取的主影像在时间序列上靠中间位置, 使所有影像时间基线合适, 保证影像的干涉质量。

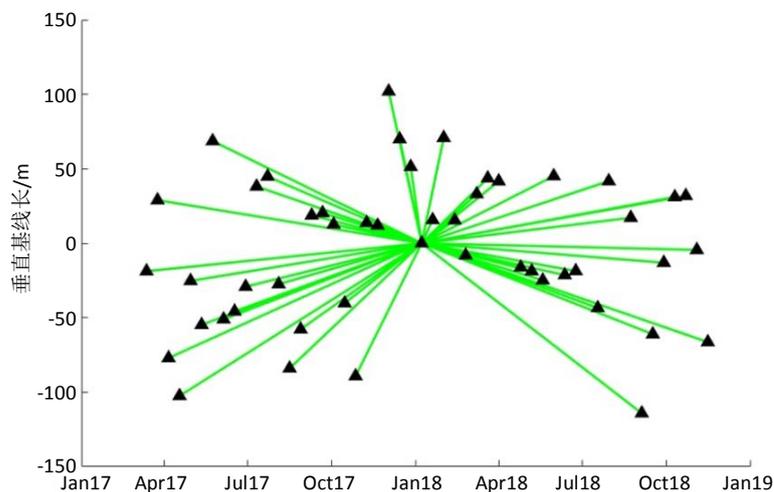


Figure 3. Baseline and time interval

图 3. 时空基线图

实验提取 DS 点的方法为 KS 统计检验方法, 主要包括以下关键步骤: 1) 通过选取合适的窗口大小, 运用 KS 统计检验方法逐个选取 SHP 点, 搜索窗口大小为 15, 设定平均阈值 100 对点进行筛选, 得到 DSC 点集; 2) 对得到的 DSC 点集进行滤波, 减弱斑点噪声效应, 达到增强相干性的目的。设置像元相干系数阈值 0.2, 从 DSC 点集中进一步筛选得到 DS 点。通过 KS 统计检验方法共选取得到 DS 点 89672 个, 相位解缠后得到相位解缠结果如图 4 所示。

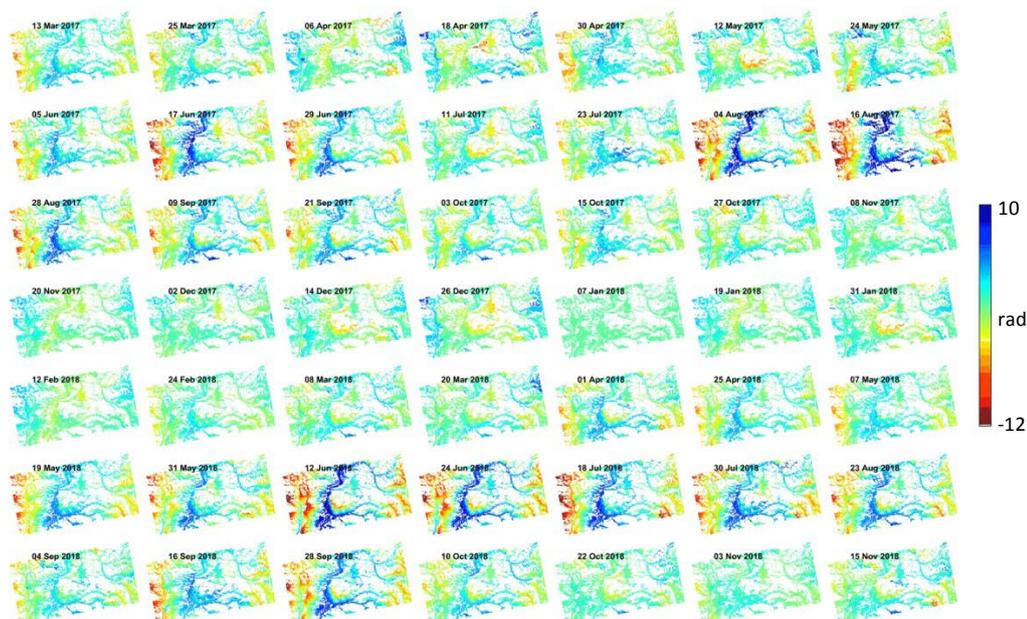


Figure 4. Phase unwrapping diagram

图 4. 相位解缠图

通过分析干涉相位的空间相关部分和空间非相关部分, 逐步分离雷达侧视角误差、大气延迟和轨道误差, 最终提取得到雷达视线方向(LOS 向)年平均形变速率, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 提取得到的 DS 点几乎全是雷达扫射到的裸露土坡, 为常见的分布式散射体。B 区域山坡发生了沉降, 年平均形变速率约为-10.9 mm/y, 而其余坡体未发生类似 B 区域的沉降变化, 标记 B 点为探测到的滑坡隐患点。

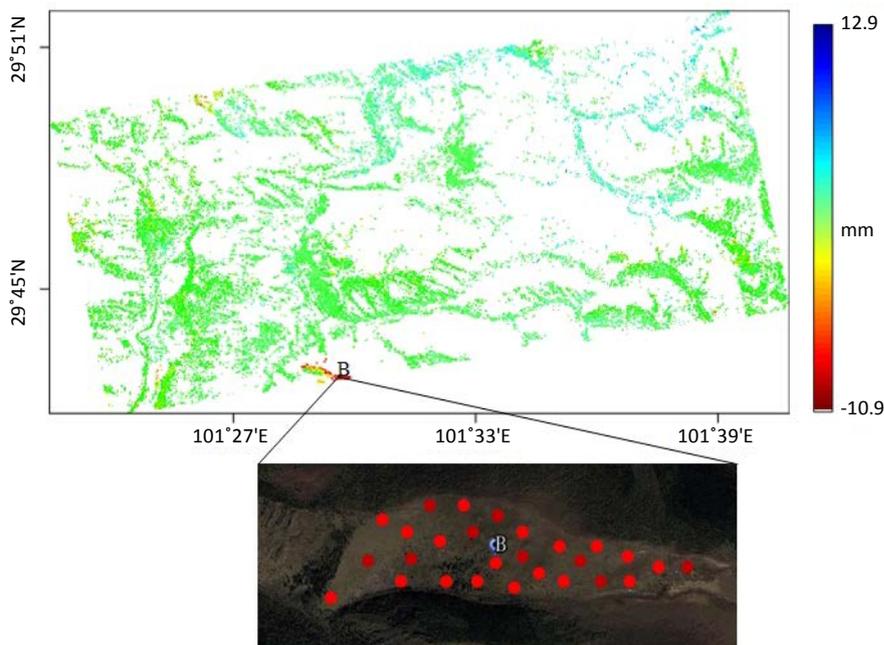


Figure 5. Annual average deformation rate in LOS direction  
图 5. LOS 向年平均形变速率

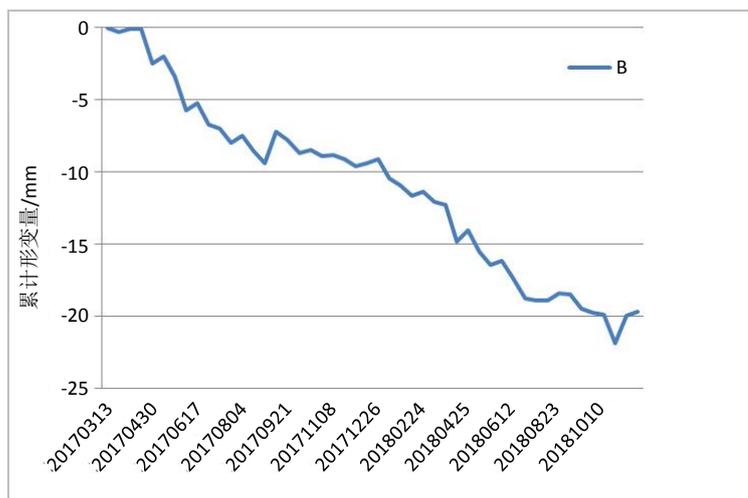


Figure 6. Time-series of deformation  
图 6. 形变时间序列

把第一景影像作为零形变起始点, B 点在 2017 年 3 月至 2018 年 11 月间的形变时间序列如图 6 所示。从 B 点形变时间序列可以看出, B 区域发生较大幅度的沉降主要发生在 2017 年 4 月 30 日至 2017 年 8 月 28 日和 2018 年 4 月 25 日至 2018 年 8 月 23 日两个时间段, 最大沉降量为 21.0 mm, 从 2018 年 8 月

23 日后, B 区域沉降逐渐趋于平稳。已有研究资料表明, 康定市多年平均降雨量 804.5 mm, 主要集中在 5~9 月, 夏季降水量达 621 mm [13] [14]。强降雨使得大量的地表水渗入地下, 使得软弱层不断受到侵蚀, 导致岩土体的抗剪强度降低; 土体的重度逐渐增大导致斜坡土体聚合力的减弱; 土体裂隙中产生静水压力, 增加坡体的滑动推力, 从而降低坡体稳定性, 引发滑坡沉降。从沉降量时间序列中可以发现, 发生较大幅度沉降的时间段主要分布于每年 5~8 月。随着雨季来临, 降雨量增大, 开始出现滑坡且沉降现象加剧, 在经过雨季之后, 随着降雨量的减少, 以及滑坡区域进行自然修复, 沉降现象得到缓解。

#### 4. 结论

本文以复杂艰险山区为实验区域, 利用覆盖康定附近复杂艰险山区的 49 景 Sentinel-1A SAR 影像, 采用 KS 统计检验方法提取出 DS 点集, 并基于提取到的 DS 点相位空间相关性, 运用时序 InSAR 技术进行滑坡形变监测。实验结果为: 朋布西乡存在滑坡隐患灾害点, 2017 年 3 月至 2018 年 11 月, 其年平均形变速率约为 -10.9 mm/y, 最大沉降量达到 21.0 mm; 且发生较大沉降时间段主要集中于每年 5~8 月, 与该区域集中降雨时间相符。实验表明, DS-InSAR 技术对复杂艰险山区进行滑坡形变监测具有重要的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 刘国祥, 丁晓利, 陈永奇, 等. 极具潜力的空间对地观测新技术——合成孔径雷达干涉[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 734-735.
- [2] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F.L. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 8-20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [4] 贾洪果, 刘国祥, 于冰. 基于超短基线 PSInSAR 的道路网沉降监测[J]. 测绘通报, 2012(5): 24-28.
- [5] Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T. and Wiesmann, A. (2003) Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. *Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2003)*, Toulouse, 21-25 July 2003, 4362-4364.
- [6] 张海波, 李宗春, 许兵, 等. IPTA 方法在地面沉降监测中的应用[J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(2): 145-149.
- [7] 傅文学, 田庆久, 郭小方, 等. PS 技术及其在地表形变监测中的应用现状与发展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1193-1198.
- [8] Kuzuoka, S., Ferretti, A. and Novali, F. (2013) An Advanced InSAR Algorithm for Surface Deformation Monitoring: SqueeSAR™. *Conference Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Tsukuba, 23-27 September 2013, 336-337.
- [9] 李涛. 基于点面散射体的多时相雷达干涉模型与形变探测方法[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [10] Hooper, A. and Zebker, H.A. (2007) Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision*, **24**, 2737. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.24.002737>
- [11] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., et al. (2004) A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, **31**, L23611. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- [12] 张诗茹, 蒋建军, 缪亚敏, 等. 基于 SBAS 技术的岷江流域潜在滑坡识别[J]. 山地学报, 2018(1): 91-97.
- [13] 刘岁海, 刘爱平. 四川省康定县地质灾害特征及其形成机理研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 226-229.
- [14] 吴昆林. 四川康定县木洼沟泥石流成因机制及防治[J]. 山西建筑, 2015, 41(20): 70-72.