

# 基于 Sentinel-1 数据的时序 InSAR 技术在滑坡监测方面的应用\*

## ——以巴东地区为例

杨长江<sup>1,2</sup> 易 祎<sup>2</sup> 赵 蓉<sup>1</sup>

(1.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083;  
2.中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

**摘 要** 本文选取湖北省巴东地区为研究区域,利用 2015—2016 年获取的 011 轨道的 11 幅和 084 轨道的 12 幅 Sentinel-1 影像,分别基于 TCPIInSAR 技术提取该区域的时序形变信息,结果分析表明:不同轨道的 InSAR 地表形变监测结果具有良好的一致性;巴东地区多处滑坡体在 2015—2016 年期间存在明显变形,其中黄土坡滑坡区域的 LOS 向平均形变速率高达-21.1 mm/a,童家坪滑坡区域 LOS 向平均形变速率达-14 mm/a;根据 InSAR 获取的巴东地区的时间序列结果表明部分滑坡呈现季节性形变。综合研究结果,利用 Sentinel-1 数据的时序 InSAR 技术可以为滑坡等地质灾害的监测和预警提供一种强有力的手段。

**关键词** Sentinel-1 ;TCPIInSAR ;滑坡 ;巴东

中图分类号 P228 P642.22 文献标志码 A DOI :10.3969/j.issn.1674-9146.2017.04.055

我国是世界上滑坡灾害最为严重的国家之一,积极开展滑坡形变监测对灾害防治具有重要指导意义<sup>[1-2]</sup>。传统滑坡监测手段主要依赖实地勘察,具有**监测范围小、作业成本高、数据更新慢**等缺陷,难以应对也难以满足我国地理国情对基础数据的需求。鉴于此,积极寻求、开展基于卫星遥感手段的滑坡监测技术对于掌握滑坡形成机理、时空演化过程具有重要科学意义与社会价值<sup>[3-4]</sup>。

星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术凭借其覆盖范围广、分辨率高、全天时全天候监测、监测精度高等优点,被广泛用于地震、火山、冰川移动、地下水抽取和地下采矿等诱发的地表形变监测研究<sup>[5-7]</sup>。在滑坡监测方面,DInSAR(差分干涉测量)技术为传统滑坡监测手段提供了很好的补充,展现出巨大潜力和优势<sup>[8-11]</sup>。然而,传统 DIn-

SAR技术受**失相关和大气延迟**的影响,严重限制了DInSAR技术在形变监测中的应用,尤其是在长时间缓慢位移的滑坡监测中的应用。为了解决该问题,以小基线集技术(SBAS)<sup>[12]</sup>、永久散射体技术(PSInSAR)<sup>[13]</sup>及TCPIInSAR技术<sup>[14]</sup>为代表的**时序 InSAR 技术**相继被提出,有效抑制了DInSAR技术中失相关和大气延迟对监测结果的影响,已在滑坡监测领域取得成功应用<sup>[15-16]</sup>。相比PSInSAR及SBAS技术,**TCPIInSAR 技术更加有效地抑制**失相关和大气延迟的影响,更加广泛地适用于地表覆盖复杂的滑坡区域形变监测。但是,由于传统中等分辨率SAR卫星**重访周期较长**,采用**TCPIInSAR 技术**难以精确捕捉滑坡动态演化过程,严重阻碍了该技术在滑坡灾害监测中的工程应用。

新一代中高分辨率卫星 Sentinel-1,具有短重

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41404013 4167040335)、国家“863”计划项目(2012AA121301)、高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(03-Y20A11-9001-15/16)、湖南省杰出青年科学基金项目(13JJ1006)、中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司科技项目(KJ-1A-KY201410-L01)、湖南省重点研发计划项目(2016SK2002)

收稿日期 2017-02-11;修回日期 2017-03-13

作者简介 杨长江(1991-)男,河南周口人,在读硕士,主要从事时序 InSAR 数据处理研究 E-mail:145012125@csu.edu.cn。

访周期(12 d),快速产品生产能力,大范围、多模式、多姿态角的特点,为实现多角度、高时空分辨率的滑坡监测提供数据保证。鉴于此本文提出基于不同轨道的 Sentinel-1 数据的时间序列 InSAR 技术对湖北省巴东城区的地表形变进行量测和分析。

## 1 TCPIInSAR 形变监测方法

### 1.1 TCPIInSAR 技术

TCPIInSAR 技术是近几年发展起来的一种时序 InSAR 技术方法,该方法结合了 PS 和 SBAS 技术的优点,沿用 SBAS 多主影像干涉组合和 PS 技术中邻域差分抑制时空失相关噪声和大气延迟的思想,利用多主影像组合的方式获取一系列短时空基线的差分干涉图,根据干涉图的相干性或者 SAR 影像配准偏移量的准则提取在时间序列影像中保持稳定散射特性的点目标,将邻近高相干点目标的相位差作为观测对象,应用最小稀疏二乘进行模型解算,估计点目标的形变信息<sup>[14]</sup>。TCPIInSAR 技术的关键处理步骤包括干涉对组合、相干点选取、参数估计以及大气改正,其数据处理流程见图 1。

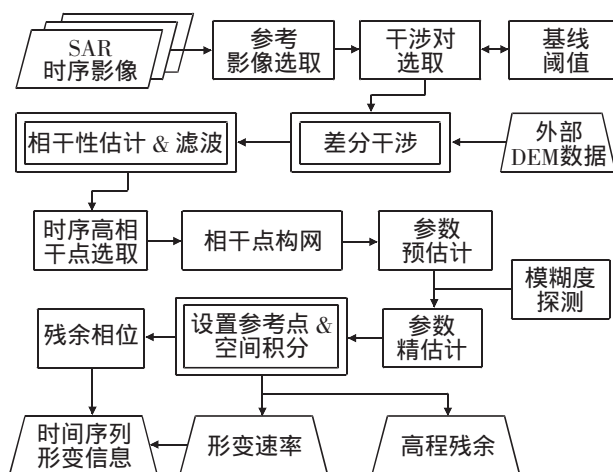


图 1 TCPIInSAR 数据处理流程

TCPIInSAR 技术提出两种选点方式,第一种是根据 SBAS 方法中平均相干图选取时序高相干点,较短的时空基线保证了相干点的数量。另一种是根据 SAR 影像配准的像素偏移量估计算法识别并选取时序高相干点。这种方法解决了部分高相干点无法在整个影像时间跨度内保持高相干性的问题,极大增加了选点的数量。TCPIInSAR 技术的另一个优点是无需相位解缠,避免了解缠误差对形变结果的影响<sup>[14]</sup>。采用局部狄洛尼三角网连接所有 TCP 点,极大增加了相干点构网的密度和邻近点弧段的数量,另外将所构网邻近点的二次差分干涉相位的弧段作为观测对象,削弱了空间强相关的大气延迟影响。对于短时空基线的差分干涉对而言,绝大多数的弧段上未包含整周模糊度,TCPIInSAR 技术提出

利用所有弧段联合解算形变速率及地形残余,并根据观测残差判断及剔除包含整周模糊度的方法,即模糊度探测法。参数估计方面,TCPIInSAR 技术提出将单景影像的轨道误差采用多项式模型加入到模型参数估计中,从而建立弧段上的相位差与 TCP 点的形变速率、地形残余以及轨道误差的多项式系数的联合解算模型,采用稀疏最小二乘完成模型参数解算。该方法有效减弱了轨道误差对形变参数解算的影响,提高了形变监测精度<sup>[14]</sup>。

### 1.2 TCPIInSAR 技术在滑坡监测方面的优势

针对 InSAR 技术在滑坡形变监测方面应用而言,由于滑坡所处地理环境特殊,如植被严重覆盖、大气环境复杂多变等因素,使得 InSAR 技术受时间、空间失相关,大气噪声和解缠误差影响严重,限制其形变精度。与传统时序 InSAR 技术相比,TCPIInSAR 技术在滑坡监测方面的主要优势在于:TCPIInSAR 技术采用短基线多主影像差分干涉,无需相位解缠,有效避免了干涉对时空失相关影响和解缠误差,为滑坡形变高精度测量提供保证。

## 2 实验研究与讨论

### 2.1 研究区域概况

巴东县位于东经 110°04'~110°32'、北纬 30°28'~31°28' 之间,长江三峡中段,地处湖北省西部,大巴山东缘,地形狭长,西高东低,南北起伏。巴东县属亚热带季风气候区,年平均降雨量为 1 100~1 900 mm,多集中在 4—9 月,其地形地貌主要为构造剥蚀、侵蚀中低山,局部发育岩溶地貌。巴东县城地质条件复杂,新构造运动及库区水位变化等外力作用,使其成为三峡库区内地质灾害最为严重的地段之一,区内发育了多个大型滑坡,较为典型的有黄土坡滑坡、赵树岭滑坡、红石包滑坡等,斜坡稳定性问题对周边人民的生命财产安全造成了极大的威胁<sup>[2 6]</sup>。

### 2.2 实验数据及数据处理

本文实验采用不同轨道的 Sentinel-1 雷达数据,时间为 2015 年 5 月—2016 年 7 月,分别为升轨 011 轨道的 11 景和升轨 084 轨道的 12 景 IW 模式的 Sentinel-1 数据,具体数据参数见第 57 页表 1。

为保证利用 TCPIInSAR 技术监测滑坡的精度及可靠性,在数据处理过程中,对部分处理方法进行了重点优化<sup>[16-17]</sup>。选用 1 弧秒 SRTM DEM 数据去除地形相位的影响;为抑制失相关噪声的影响,采用改进的 nonlocal 滤波对差分干涉图进行滤波;为保证有足够数量的时序高相干点进行时序构网、建模以及模型解算精度,设定相干性阈值为 0.06,像元采样间隔阈值为 300 m,构网半径阈值为 700 m。

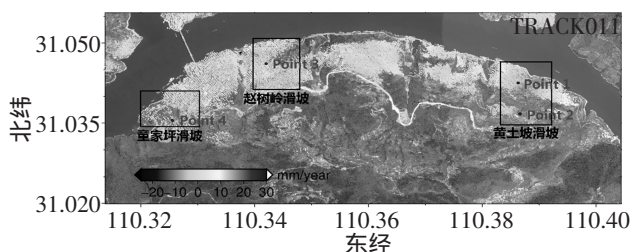
表1 2015—2016年 Sentinel-1 覆盖巴东地区  
实验数据集参数信息 (c)

卫星	时间 (年,月,日)	轨道	入射角	成像模式
Sentinel-1	2015/06/15—2016/07/03	011	33.8	IW
Sentinel-1	2015/06/20—2016/07/08	084	43.9	IW

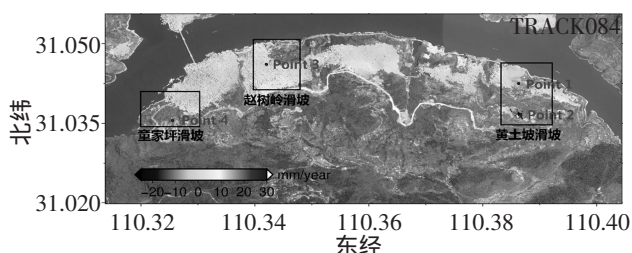
### 2.3 结果分析与讨论

根据 2.2 节提出的数据处理步骤, 分别解算出 Track011 和 Track084 数据下巴东城区 2015 年 6 月—2016 年 7 月的年平均形变速率场, 见图 2 (底图为 Google 地球影像), 速率范围均在  $-25 \sim 30$  mm/a 之间, 负值代表远离卫星方向。不难看出, 两种轨道的 Sentinel-1 数据监测到巴东城区的 LOS 向形变速率结果呈现出较好的一致性, 也侧面验证了本实验的结果精度。由于不同轨道传感器入射角不同以及时间、空间失相关等影响, 两个不同轨道的 Sentinel-1 数据监测的研究区域形变分布存在略微差异, 但主要形变区域十分吻合。

为进一步分析巴东城区主要滑坡体形变情况, 分别选取黄土坡滑坡、赵树岭滑坡、童家坪滑坡等区域的形变监测结果, 见图 2 标注区域。



2-a Track011

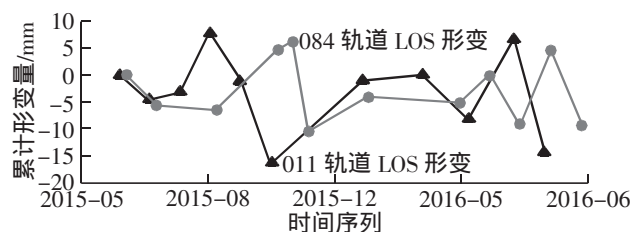


2-b Track084

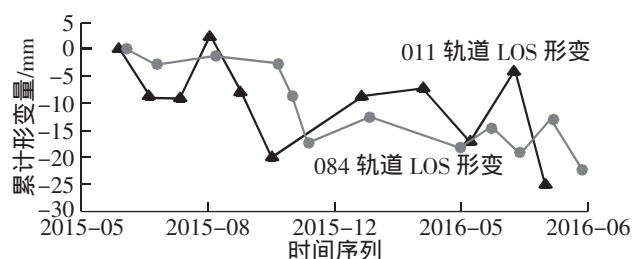
图2 利用 Track011 和 Track084 Sentinel-1 数据监测的巴东城区主要滑坡区域的一维 LOS 向地表形变速率场

黄土坡滑坡位于巴东城区中的黄土坡小区, 黄土坡地区地质复杂, 岩性破碎, 该滑坡体西南高东北低, 不同时期的滑坡与崩滑体叠置堆积造成滑坡前缘相对较厚, 约 65 m, 滑坡体后缘厚度 40.5 m, 前缘高程为 50~70 m, 后缘高程为 580~600 m, 区域物质组成成分复杂多样, 作为三峡库区主要滑坡之一<sup>[18-19]</sup>。为分析黄土坡滑坡在 2015—2016 年期间的变形情况, 分别在黄土坡滑坡前缘和后缘选取 1 点进行时间序列分析 (Point 1 和 Point 2)。从图 2 可以看出, 不同轨道下黄土坡滑坡区域的滑坡前缘

Point 1 和滑坡后缘 Point 2 位置均呈现严重的滑动变形, 滑坡前缘和后缘 011 轨道下 Point 1 和 Point 2 位置的 LOS 向年平均形变速率分别为  $-9$  mm/a 和  $-16.7$  mm/a, 084 轨道下 Point 1 和 Point 2 位置的 LOS 向年平均形变速率分别为  $-12.6$  mm/a 和  $-21.1$  mm/a, 整体呈现下滑趋势。图 3 为两个位置点在不同轨道下获取的时序形变信息, 累计形变量趋势基本一致, 表明该滑坡体正经历严重形变, 并处于缓慢下滑状态。



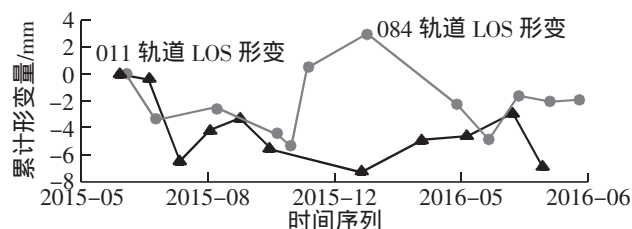
3-a Point 1



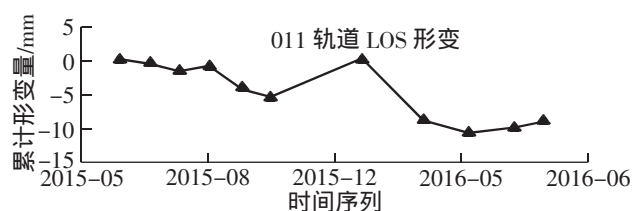
3-b Point 2

图3 黄土坡滑坡体 Point 1 和 Point 2 位置的时序形变

赵树岭滑坡位于三峡工程库区的巴东县新城云沱小区, 滑坡区内地质成分与黄土坡地区十分相似, 为易滑地质。滑坡呈勺状, 南北长约 900 m, 东西长约 550 m, 滑坡前缘高程约为 100 m, 滑坡表明呈阶梯状<sup>[18-19]</sup>。由图 2 可知, 赵树岭滑坡区域在 2015—2016 年期间整体处于稳定状态, 仅有部分陡坡区域存在局部变形失稳, 但未影响滑坡区域的整体稳定性, 图 4-a 为在赵树岭滑坡区域所取



4-a Point 3



4-b Point 4

图4 赵树岭滑坡体 Point 3 位置和童家坪滑坡体 Point 4 位置的时序形变



Point 3 位置点的形变序列结果,由此可知,该滑坡体形变趋势较为平缓。

童家坪滑坡位于巫峡出口处长江南侧岸坡地带,与巴东新城区域西壤坡小区相邻,滑坡平均厚度约 28 m,滑坡面积约 35 万  $\text{m}^2$ ,滑坡前缘高程约为 90 m,后缘高程约为 340m,滑坡体呈陡缓相间的折线型<sup>[19]</sup>。由图 2 可知,童家坪滑坡区域存在变形,形变速率约-10 mm/a,图 2 中高相干点 Point 4 的时间序列结果见图 4-b,由于失相关影响,084 轨道数据未能在该区域选出高相干点,从图 4-b 可以看出,该位置点在 2016 年 2 月—5 月存在急剧变形情况,查阅当地资料可知,此区域正在开挖新建公路,以致于滑坡体稳定性受到破坏,由此证明了 InSAR 技术在滑坡监测中探知滑坡发生时间点的可行性和准确性。

### 3 结论与展望

本文以巴东城区滑坡形变为研究对象,利用新一代 SAR 卫星数据——Sentinel-1 影像,采用 TCPIInSAR 技术成功获取了巴东城区的地表时间序列形变信息,依据不同轨道数据验证了监测结果的可靠性。结果表明,巴东城区部分滑坡体呈现明显变形,其中黄土坡滑坡和童家坪滑坡在 2015—2016 年期间存在变形,最大形变速率为-25 mm/a。

因此,随着新型高分辨率和短重访周期的 SAR 传感器的研发,时序 InSAR 技术能够获取更高时空分辨率的地表形变信息,在滑坡灾害监测与防治工作中具有广阔的前景。与传统滑坡灾害监测手段相比,时序 InSAR 技术在滑坡灾害稳定性监测中的优势主要体现在以下几个方面:一是无需人工测量和布设监控点,监测成本低;二是针对大区域、大范围滑坡灾害形变监测,SAR 影像能实现全覆盖;三是时序 InSAR 技术能够提供的量测点密度远远高于传统形变监测手段,且对地表的微小形变监测能力达到厘米甚至毫米的量级。

参考文献:

- [1] 丁继新,杨志法,尚彦军,等.降雨型滑坡时空预报新方法[J].中国科学.D 辑:地球科学,2006(06):579-586.
- [2] 殷跃平.长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究[M].北京:地质出版社,2004.
- [3] 孙倩.多基线/多时相和多平台 InSAR 滑坡监测研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [4] 冯春,张军,李世海,等.滑坡变形监测技术的最新进展[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(1):11-16.
- [5] 王治华.三峡水库区城镇滑坡分布及发育规律[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):33-38.
- [6] XU Wenbin, LI Zhiwei, DING Xiaoli, et al. Application of small baseline subsets D-InSAR technology to estimate the time series land deformation and aquifer storage coefficients of Los Angeles area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2):452-461.
- [7] 何敏,何秀凤.合成孔径雷达干涉测量技术及其在形变灾害监测中的应用[J].水电自动化与大坝监测,2005,29(2):45-48.
- [8] 刘国祥.利用雷达干涉技术监测区域地表变形[M].北京:测绘出版社,2006.
- [9] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas - differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183-9191.
- [10] FRUNEAU B, ACHACHE J, DELACOURT C. Observation and modelling of the Saint-étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry[J]. Tectonophysics, 1997, 265(3-4): 181-190.
- [11] COLESANTI Carlo, WASOWSKI Janusz. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar(SAR) interferometry[J]. Engineering Geology, 2006, 88(3-4): 173-199.
- [12] 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): 2375-2383.
- [13] FERRETTI A, PRATIC, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [14] ZHANG Lei, DING Xiaoli, LU Zhong. Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 547-556.
- [15] BALZ Timo. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(4): 590-601.
- [16] LIU Peng, LI Zhenhong, HOEY Trevor, et al. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 21(1): 253-264.
- [17] ZHANG Lei, LU Zhong, DING Xiaoli, et al. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117(1): 429-439.
- [18] 连志鹏.巴东县新城区库岸斜坡稳定性研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [19] 何惠军.巴东新城区库岸岩质滑坡变形研究[D].长沙:湖南科技大学,2011

(责任编辑 尚晓春)

(下转第 63 页)

机 ECU, 补机发动机启动。补车上的重联控制开关 Q1 置于补机位, 继电器 KC1 线圈吸合, KC1.1-KC1.2 触点接通, 切断主机发动机点火电路, 补车上主机点开关无效。

### 3.4 重联旁路制动原理说明

当作业车处于单机控制功能时, 重联控制开关处于单机位, KC5 控制线圈不得电, 图 6 中的 KC5.3-KC5.4 是常闭状态, 操作旁路制动开关 SA1, 201 得电, 旁路制动电磁阀 YM1 得电, 车辆实施制动。当作业车处于重联控制功能时, 不论重联控制开关处于主机位, 还是处于补机位, 重联控制开关的 202 线接通, KC5 控制线圈得电, 图 6 中的 KC5.3-KC5.4 由常闭状态断开, 操作旁路制动开关 SA1, 将旁路制动指令 201a 输入给主机微机控制器, 主机微机控制器通过 485 通信线将旁路制动

信号送到补机微机控制器。主车微机控制器、补车微机控制器同时输出旁路制动信号 201K, 各处驱动该车继电器 KC9 线圈得电, 图 6 中, KC9.1 由常开状态闭合, 旁路制动电磁阀 YM1 得电, 车辆实施同步制动。

### 4 结束语

该重联方案已在中车太原机车车辆有限公司生产的 TY5 型四轴液机传动接触网作业车上试用。实现了在主车上完成补车点火的功能; 单车操作能够实现重联各作业车速度、挡位、运行方向以及制动的同步控制性, 重联操作的整个过程准确无误, 达到了重联控制牵引、制动的性能要求。

参考文献:

- [1] 李志锋. 接触网作业车专业知识培训教材[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012. (责任编辑 邸开宇)

## Double Heading Program Design of TY5 Catenary Working Vehicle

FENG Li<sup>1</sup> PAN Yi-hong<sup>2</sup>

(1. CRRC Taiyuan Co., Ltd, Taiyuan 030009 China ;

2. Urban Railway Company, China Railway Electrification Bureau (Group) Co., Ltd, Beijing 100036 China )

**Abstract :** The paper briefly introduces TY5 catenary working vehicle and expounds its double heading program from the function and electrical principle. Then it analyses three kinds of working conditions of double locomotive traction and expounds the specific realization scheme. By adding the control circuit, microcomputer controller and double heading socket, the synchronization control of the double heading vehicle is realized. The program not only keeps the original function and current system control requirements, but also meets the requirements of double locomotive traction.

**Key words :** operation vehicle for contact wire; double heading scheme; the principle of double heading; synchronization control

(上接第 58 页)

## Monitoring Landslide Movements Using Time Series InSAR with Sentinel-1: Application to Badong Area

YANG Chang-jiang<sup>1,2</sup> ,YI Yi<sup>2</sup> ZHAO Rong<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083 China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071 China )

**Abstract :** In this paper, based on the TCPInSAR technique, the temporal deformations information of Badong area are extracted by using the 11 and 12 Sentinel-1 images from track 011 and track 084 during May 2015 to July 2016, respectively. The results indicate that the surface deformation monitoring results in different tracks are in good agreement with each other, the landslides in the Badong area have experienced obvious deformation during the period from 2015 to 2016, and the average deformation rate in loess slope landslide area is up to -21.1 mm/year, the average deformation rate is up to -14 mm/year in Tongjiaping landslide area. Furthermore, the time series deformation results show that some landslide in the Badong area experience seasonal deformation. It is concluded that time series InSAR with Sentinel-1 data can provide a powerful mean for monitoring and early warning of landslide hazards.

**Key words :** Sentinel-1; TCPInSAR; landslide; Badong