https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.180



时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与 状态更新

史绪国¹,徐金虎¹,蒋厚军^{2*},张 路³,廖明生³

1. 中国地质大学地理与信息工程学院,湖北武汉 430074

2. 南京邮电大学地理与生物信息学院,江苏南京 210023

3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北武汉 430079

摘 要: 坡体表面形变是表征坡体稳定性的重要信息,因此,非常有必要对滑坡多发区域进行时序常规变形监测.近年来,星载合成孔径雷达数据由于其覆盖范围大、形变监测精度高的特点,被越来越多的用于山区滑坡识别与探测.首先介绍了联合分布式目标与点目标的时序 InSAR 方法,并将该方法应用于分析覆盖三峡藕塘滑坡的 2007 年至 2011 年的 19 景 ALOS PALSAR 数据和 2015 年至 2018 年的 47 景 Sentinel-1 数据,提取了数据覆盖时间段内的藕塘地区的变形速率.发现相比于 2007 年至 2011 年,2015 年至 2018 年新增三处不稳定斜坡.进一步对滑坡的时序变形分析表明,降雨和水位变化是坡体稳定性最大的两个影响因素.实验证明时序 InSAR 方法可以作为常规形变手段来识别与监测三峡库区等地区潜在的滑坡,为防灾减灾提供支持与依据.

关键词: 藕塘滑坡;形变监测;时序 InSAR;降雨;水位变化;工程地质.
中图分类号: P642
文章编号: 1000-2383(2019)12-4284-09
收稿日期: 2019-05-16

Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis

Shi Xuguo¹, Xu Jinhu¹, Jiang Houjun^{2*}, Zhang Lu³, Liao Mingsheng³

- 1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
- 2. School of Geographic and Biologic Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China
- 3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Slope displacement is the most direct embodiment of slope stability. Thus, it is of great significance to monitor the known landslides and detect the unknown landslides by routine time series displacements of landslide prone areas. Synthetic Aperture Radar (SAR) images with its wide coverage and capability of high presicion displacement monitoring play more and more important roles in landslide identification and detection. In this study, time series InSAR analysis method combining distributed scatterers and point-like targets is introduced. Then, we investigate the stability of the Outang landslide and surrounding slopes

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41702376,41774006,41501497);长江科学院开放研究基金资助项目(No.CKWV2018482/KY);中央高校业务经费专项资助(Nos.CUG170634,NY214197).

作者简介:史绪国(1988-),副教授,研究方向为星载雷达卫星遥感地质灾害形变监测算法与应用.ORCID:0000-0003-2815-7897.E-mail: shixg@cug.edu.cn.

^{*} 通讯作者:蒋厚军, E-mail: jianghouj@njupt. edu. cn

引用格式:史绪国,徐金虎,蒋厚军,等,2019.时序InSAR技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新.地球科学,44(12):4284-4292.

with 19 ALOS PALSAR images from 2007 to 2011 and 47 Sentinel-1 images from 2015 to 2018. Three new active slopes were identified with the Sentinel-1 datasets compared with the results from ALOS PALSAR datasets. Time series displacement analysis indicate the rainfall and water level fluctuation seriously affect the stability of slopes in the Three Gorges area. As a result, time series InSAR analysis can be carried out routinely to monitor and detect potential landslides.

Key words: Outang landslide; displacement monitoring; time series InSAR analysis; rainfall; water level; engineering geology.

0 引言

滑坡是指山体边坡上的一部分岩土体在内外 各种因素的作用下失去稳定性,从而导致其整体沿 某一滑动面向下滑动的现象(丁继新等,2006).由于 其发生的广泛性以及巨大的破坏力,滑坡已成为危 害程度排名第二的自然灾害,仅次于地震(丁继新 等,2006).近年来,由于人类活动和自然因素的影 响,我国的三峡和四川等西部山区滑坡灾害频发, 给人民的生命财产安全带来严重威胁(Huang, 2009).因此,急需对滑坡进行识别与长期监测,为滑 坡预报预警以及治理提供有力依据.

作为滑坡稳定性的最直接体现,滑坡表面形变 一直是人们关注的重点.因此,人们尝试了许多形 变监测手段方法例如传统的大地测量、全球定位系 统和雷达干涉测量(InSAR)等来监测滑坡变形,并 尝试用获取到的信息对滑坡进行预报预警.但上述 提到的传统手段在山区条件下布设困难.而星载合 成孔径雷达(SAR)由于其覆盖范围大、不受云雾影 响与毫米级的监测精度的特点,在山区滑坡变形监 测中发挥越来越重要作用.

2000年,学者们将差分干涉测量技术(DIn-SAR)引入,并率先在三峡库区链子崖滑坡、新滩滑 坡和树坪滑坡等典型滑坡体上布设人工角反射器, 开展差分干涉测量滑坡形变监测,在角反射器上取 得毫米级的监测精度(Xia et al., 2002).但同时发现 三峡植被覆盖茂密,实验效果受植被和大气扰动影 响严重.而随着SAR影像的不断积累,学者们提出 了时序InSAR形变监测技术如永久散射体干涉测 量(Ferretti et al., 2000, 2001)技术和小基线数据集 技术(SBAS)(Berardino et al., 2002)来克服去相干 和大气扰动的影响.时序InSAR技术只对时序SAR 影像中的高相干点目标进行形变分析,这些点目标 不受时间、空间失相干的影响,并可根据高程误差 和大气分布的特点,移除相应的干扰相位,监测精 度达到毫米级.我国学者利用时序InSAR技术在三 峡库区黄土坡滑坡和树坪滑坡(Ye et al., 2004; Liu et al., 2013; Shi et al., 2015, 2016, 2018)、舟曲 泥石流(Sun et al., 2015)、四川理县滑坡和茂县 滑坡(Chen et al., 2014; Tang et al., 2015; Qu et al., 2016; Dong et al., 2018a) 和黄土滑坡(Zhu et al., 2014; Zhao et al., 2016) 上取得成功的应用. 然 而,研究中也发现自然地表中,特别是山区,由于滑 坡体覆盖多和植被覆盖多,识别出的点目标有限, 解算过程中很容易出现解缠误差,导致最终结果不 可靠(Wasowski and Bovenga, 2014).因此,需要充 分利用SAR影像中的点目标与分布式目标,提高自 然地表中识别出的点目标密度与形变监测精度 (Ferretti et al., 2011; Dong et al., 2018b), 实现山区 滑坡的高精度识别探测.随着星载雷达传感器的发 展与历史数据的积累,在同一地区积累了大量的星 载SAR影像,有利于对同一地面目标进行形变历史 回溯分析与稳定性更新,为滑坡预报预防提供及时 的信息更新.

本文介绍了联合 SAR影像中永久散射体和分 布式点目标的时序 InSAR分析算法的基本原理,利 用此算法对覆盖三峡藕塘滑坡的 2007 年 8 月至 2011 年 2 月的 19 景L波段 ALOS PLASAR 数据和 2016 年 5 月至 2018 年 2 月的 47 景C波段 Sentinel-1 数据进行分析,获取藕塘滑坡形变场,并对藕塘滑 坡及周围坡体稳定性进行监测及状态更新,最终对 影响因素进行分析.

1 时序InSAR分析方法

SAR图像中的像素可以分为两类:永久散射体 (persistent scatterer, PS)占主导地位的点目标和分 布式散射体(distributed scatterer, DS)占主导地位的 分布式目标.一般来说,如果像素内的某个散射体 的回波远远大于周围的地面目标且相对较稳定,就 可以称此像素为永久散射体.反之,如果一个像素 内没有任何散射体的回波可以占据主导地位,此像 素为分布式目标,在自然场景中一般对应低矮植被 或者裸土等地面目标.点目标可以在很长的时间内 保持高相干性,其信噪比高,相位稳定性强.分布式 目标则受时间去相干、空间去相干以及体散射去相干等因素影响较大,相位稳定性低,噪声严重.因此,为了对地面目标进行连续监测,稳定性较高的点目标是首选.但是,由于自然场景下,典型的点目标如人工建筑和裸露的岩石等目标稀疏.在InSAR时序分析的关键步骤中,稀疏的点目标会引入相位解缠误差,从而导致最终结果不可靠(Wasowski and Bovenga,2014).因此,为了增加点密度以保证InSAR解算可靠性,需要结合自然场景中的点目标和分布式目标,进行联合分析.

1.1 点目标与分布式目标提取

在对获取的数据集进行主影像选取、配准、重 采样和差分干涉等处理后,就可以得到时间序列的 差分干涉图.由于时序差分干涉图受时间和几何去 相干的影响,因此,需要选取稳定点目标进行分析. 点目标可以采用传统的振幅离差(Ferretti *et al.*, 2001)进行初步分析筛选,并最终通过相位的稳定 性测度来确定(Hooper *et al.*,2007).通常情况下,可 以通过带通滤波将缠绕相位中的轨道误差相位和 形变等估计出来.还可以通过基线与相位之间的线 性关系得到高程误差引起的相位.从缠绕的干涉相 位中移除上面估计得到得相位后可以得到相位残 差,并估计相位稳定性γ:

$$\gamma = \frac{1}{N} \bigg| \sum_{i=1}^{N} \exp\sqrt{-1} \phi_{\text{res}}^{i} \bigg|, \qquad (1)$$

其中:N表示干涉图数, ϕ_{res}^{i} 表示相位残差.

由于分布式目标信噪比与相位稳定性较差,因 此分布式目标的选取需要进行同质点滤波增强像 素信噪比,并据此估计像素最优相位.一般来说,相 似地面目标的回波信号也是相似的.因此,在SAR 图像足够的情况下(N>20),可以通过非参数假设 检验的方法例如KS检验和AD检验等识别SAR影 像同质点(Ferretti et al., 2011), 但运算量比较大.当 SAR影像数量低于20景时,由于样本较少,非参数 测试的方法估计得到的同质点信息将会产生不确 定性.本文采用了快速同质点选取方法(FaSHPS) (Jiang et al., 2015), 此方法通过将高斯假设背景下 的假设检验问题转换为置信区间估计来提高运行 效率.同时,由于模型确定,在小样本情况下可以取 得优于非参数假设检验的同质点选取结果(蒋弥 等,2016).利用上述方法获取到同质点后,传统DS 的时序 InSAR 分析方法一般采用全组合的干涉图 组合策略进行同质点分析(Ferretti et al., 2011), 估计最优相位.而对于植被覆盖茂密的三峡库区 等地区,干涉图中的大部分地面目标会出现快速失 相干,这种情况下进行全组合分析耗时且意义不 大,因此,本文中延续小基线数据集中的短时间基 线和空间基线的组合策略.随后,采用相干性为权 重对组合得到的干涉图进行非局部同质点滤波 (Deledalle *et al.*,2011),用滤波得到的相位代替窗 口内中心点相位.最终的DS同样通过相位稳定性 测度确定.

1.2 时间序列分析处理

在确定了 PS 和 DS 之后,接下来就可以将上述 点集整合,一起进行三维相位解缠(Hooper and Zebker,2007). 解缠后的相位 ϕ 包含了有形变 ϕ_a 、轨道 误差 ϕ_a 、高程误差 ϕ_{dem} 、大气扰动 ϕ_a 以及热噪声 ϕ_n 等相位分量.而其中每个分量具有各自的特点,因 此可以逐一进行估计.

$$\phi = \phi_d + \phi_o + \phi_{dem} + \phi_a + \phi_n. \tag{2}$$

干涉图中由星历不准确导致的轨道相位趋势 是空间相关的,因此必须首先移除此干扰项才能进 行下一步操作,估计其他相位信息.轨道相位趋势 可以通过一个双线性多项式进行拟合(Shi et al., 2016).DEM误差则可以通过垂直基线与地形之间 的线性关系通过最小二乘方法获取.对于差分相位 中的大气分量,由于山区大气变化复杂,需通过与 高程相关的线性模型与组合滤波的方法联合估计 大气(Liao et al., 2013).在估计得到上述相位分量 之后,就可以通过最小奇异值分解方法获取时间序 列形变信息.

2 实验区与数据简介

三峡水库是当今世界最大的水利枢纽工程,干 支流库岸总长达5300km,库区内以滑坡为主的地 质灾害众多.三峡大坝的建设于2006年完工,大坝 上游水位由蓄水前的64m上升到最高175m.因此, 大坝上游水面大幅拓宽,很多坡体没入水中,触发 了很多古滑坡,同时也诱发了很多新滑坡,例如千 将坪滑坡和树坪滑坡等(Wang et al.,2008a,2008b). 与此同时,三峡上游水位的周期性涨落与集中的降 雨给三峡库区坡体稳定性带来了巨大威胁.

藕塘滑坡位于重庆奉节县城上游12km的长江 南岸(图1),是受三峡蓄水试验影响较大的古滑坡 之一(代贞伟等,2016).藕塘滑坡属于顺层基岩滑 坡,北低南高,滑坡长约1800m,整体相对高差



109.3° 109.4° 图 1 藕塘滑坡位置 Fig.1 Location of the Outang landslide

底图为2018年6月10日获取的Sentinel-2光学数据



圆圈表示影像数据,直线表示干涉图组合

610 m,平均厚度约50.8 m,总体积约9×10⁷ m³,面 积约1.78 km².自三峡工程蓄水以来,藕塘滑坡发生 了较大变形,给人民群众的人身财产安全以及长江 航道的通畅运行产生巨大影响.因此,对滑坡影响 范围内的安坪藕塘集镇启动整体搬迁工作,于2016 年8月完工.

本文收集到 19景 2007年8月至 2011年2月的 ALOS PALSAR 数据和47景 2016年5月至 2018年 2月的 Sentinel-1数据.处理中将 ALOS PALSAR 数 据集中的双极化(FBD)数据过采样到单极化(FBS) 数据的像素间距以便交叉模式数据干涉.两个数据 集都是升轨观测,采用了 34°左右的视角.本文采用 了 30 m 分辨率的 SRTM DEM 生成差分干涉图和地 理编码.图 2 中展示了本文中 SAR 数据获取的时间 以及用于时序 InSAR 分析所采用的干涉对组合.

3 实验结果分析

3.1 滑坡平均形变速率

利用第1.2部分中提到的方法,本文获取了藕 塘滑坡及其周围坡体的年平均形变速率.ALOS PALSAR数据集共探测到76508个点目标,Sentinel-1数据集探测到60041点目标.由于三峡地区植 被覆盖多,C波段Sentinel-1数据容易受失相干影 响,因此Sentinel-1数据集探测到的点密度要低于 ALOS PALSAR数据集.图3a和图3b数据集都探 测到了藕塘滑坡和藕塘滑坡东侧1.5 km处的坡体. 其中藕塘滑坡的最大形变速率可达50 mm/a.藕塘 滑坡东侧坡体在2007年至2011年间变形速率在 80 mm左右,但2016年至2017年间变形速率有所 放缓,最大形变速率50 mm/a.值得注意的是,Sentinel-1数据集获得的结果还探测到其余三处不稳定 斜坡,如图3b中实线所标位置.其中形变最严重的 滑坡(图3b矩形框所示)形变速率在80 mm/a.接下 来将对藕塘滑坡等时序形变及影响因素进行重点 分析.

3.2 时间序列分析与影响因素

水位的周期性涨落和季节性降雨是长江沿岸

滑坡稳定性最大的威胁(黄发明等,2018;王芳等, 2018).图4分别给出了ALOS PALSAR数据集和 Sentinel-1数据集获取到的图3中所示的P1点和P2 点时序变形,其中P1点位于藕塘滑坡.由于2007年 8月至2011年2月间仅仅获取了19副ALOS PAL-SAR影像,稀疏的数据采样率很难发现短时间内滑 坡的非线性变化.Sentinel-1数据12天的重访周期 为我们提供了更多的观测,可以捕捉到时序形变中 的细节.从图4a中可知,藕塘滑坡在2007年8月至 2011年2月间发生了约90 mm的视线向变形,形变 趋势接近线性.2016年5月至2018年2月间藕塘滑 坡累计变形达到了110 mm,根据图4c可以发现滑 坡变形主要发生在雨季和三峡库区水位下降时间 段内.特别是在2016年7月6日至7月9日的连续累



图 3 利用 ALOS PALSAR 数据集(a)和 Sentinel-1 数据集(b)获取的平均速率

Fig.3 Mean displacement velocity map obtained from ALOS PALSAR datasets (a) and Sentinel-1 dataset (b) 虚线表示两个数据集共同探测到的滑坡范围,实线表示 Sentinel-1数据探测到的滑坡.其中实线方框中为图5所示位置



图 4 ALOS PALSAR 数据集和 Sentinel-1 数据集获取的(a)、(c) P1和(b)、(d) P2点形变序列与相应的水位和降雨 Fig.4 Time series displacements of (a), (c) P1 and (b), (d) P2 from ALOS PALSAR dataset and Sentinel-1 dataset and corre sponding rainfall and water level

计降雨达到180 mm,滑坡短时间内发生了约45 mm 的形变.同样,在2017年4月至10月期间,伴随着水 位的下降与降雨的增加,藕塘滑坡的变形也呈现加 速趋势.图4b中可以看到P2点在2016年5月至 2018年2月间累计形变达到了约200 mm.而2016 年5月至2018年2月,P2点的变形有所放缓,约为 110 mm(图4d).雨季和三峡水位下降期间P2点的 滑坡的形变加速非常明显.

本文没有获取到验证数据对时序 InSAR结果 进行定量评价,但可以通过图 5 对滑坡探测结果的 可靠性进行定性说明.图 5 给出了利用本文方法探 测到的滑坡相关信息.其中图 5a 中的光学影像获取 时间为 2010 年 3 月 19 日,位于 ALOSPALSAR 数据 集的观测时间内,可以看到图中虚线位置坡体完整 度较好,而 ALOS PALSAR 数据测量结果显示此时 坡体处于稳定状态.图 5b 为 2018 年 4 月 3 日获取光 学影像,白色虚线区域内坡体覆盖类型发生了明显 变化,应为新发滑坡,中心位置为北纬30.9607°,东 经109.3307°,海拔240m.同时可以从光学影像中 判断,2010年后此区域人为活动加剧,本区域加剧 的人为活动与密集的降水极有可能对是触发滑坡 的最主要影响因素.而如图5c所示,利用Sentinel-1 数据集可以在新滑坡上探测到明显变形,其中造成 图 5c 中探测到的形变点目标的分布与滑坡范围不 完全一致的主要原因为定位误差.图 5d 给出了 P3 点的时序变形.时序变形序列显示滑坡变形主要集 中雨季和水位下降时段.不过滑坡最底部的海拔高 度约为220m,高于最高蓄水水位,因此可以认为水 位的变化对滑坡稳定性影响较小,降雨对滑坡稳定 性的影响更大.同样,图6中给出的Sentinel-1数据 获取的图3中点P4和P5时序变形也可以发现与P3 点类似的变化趋势.因此,时序InSAR分析的方法 不仅可以探测到新的滑坡,也可以对重点滑坡进行 时序常规监测.



图5 新发现滑坡示例

Fig.5 An example of newly detected landslide

a.2010年3月19日Google Earth光学影像;b.2018年4月3日Google Earth光学影像;c.Sentinel-1获取平均形变速率;d.P3点时序形变与降雨和水位



Fig.6 Time series displacement of P4 (a) and P5 (b) and corresponding rainfall and water level

4 结论与展望

本文主要利用时间序列 InSAR 方法对三峡奉

节藕塘滑坡及其周围坡体开展了稳定性监测,并通过2007年至2011年的ALOS PALSAR数据集和2016至2018年Sentinel-1数据集对坡体状态进行更

新.笔者发现藕塘滑坡与位于藕塘滑坡往西1.5 km 的一处坡体一直处于不稳定状态.由于人类活动、 集中降雨与水位变化的影响,研究区内2016年5月 至2018年2月发现3处新增不稳定坡体.通过时序 分析发现,滑坡形变主要受强降雨控制,同时水位 变化也有一定的影响,呈现阶跃式变形特征.从实 验结果可以看到,时序InSAR方法非常适合在三峡 库区等地质灾害多发区开展大范围的不稳定坡体 的探测与状态更新.随着不断积累的SAR数据与不 断缩短的卫星重访周期,常规性的地质灾害监测与 时序分析可以为工程地质等领域提供更多的支持, 为防灾减灾提供依据.

致谢:本文所采用 ALOS PALSAR 数据由日本 字航局提供(PI1247, PI1440, PI3248).Sentinel-1和 Sentinel-2数据由欧洲空间局免费提供.30m分辨率 SRTM 数据由美国地质调查局提供.同时感谢两位 评审专家给出的建设性意见.

References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., et al., 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.https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.803792
- Chen, Q., Cheng, H.Q., Yang, Y.H., et al., 2014. Quantification of Mass Wasting Volume Associated with the Giant Landslide Daguangbao Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake from Persistent Scatterer InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 152: 125-135.https://doi.org/ 10.1016/j.rse.2014.06.002
- Dai, Z.W., Yin, Y.P., Wei, Y.J., et al., 2016.Deformation and Failure Mechanism of Outang Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Engineering Geology*, 24 (1): 44-55 (in Chinese with English abstract).
- Deledalle, C. A., Denis, L., Tupin, F., 2011. NL InSAR: Nonlocal Interferogram Estimation. *IEEE Transactions* on Geoscience and Remote Sensing, 49(4): 1441-1452. https://doi.org/10.1109/tgrs.2010.2076376
- Ding, J.X., Yang, Z.F., Shang, Y.J., et al., 2006.New Method of Predicting Rainfall-Induced Lanslides. Science in China (Series D), 36(6): 579-586 (in Chinese).
- Dong, J., Zhang, L., Li, M.H., et al., 2018a. Measuring Precursory Movements of the Recent Xinmo Landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 Datasets. *Landslides*, 15(1): 135-144. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0914-8

- Dong, J., Zhang, L., Tang, M.G., et al., 2018b.Mapping Landslide Surface Displacements with Time Series SAR Interferometry by Combining Persistent and Distributed Scatterers: A Case Study of Jiaju Landslide in Danba, China. Remote Sensing of Environment, 205: 180-198. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.022
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., et al., 2011.A New Algorithm for Processing Interferometric Data - Stacks: SqueeSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(9): 3460-3470. https://doi. org/ 10.1109/tgrs.2011.2124465
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geosci*ence and Remote Sensing, 38(5): 2202-2212. https:// doi.org/10.1109/36.868878
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geosci*ence and Remote Sensing, 39(1): 8-20.https://doi.org/ 10.1109/36.898661
- Hooper, A., Segall, P., Zebker, H., 2007. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B7 B07407.https://doi.org/10.1029/2006jb004763
- Hooper, A., Zebker, H.A., 2007. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series. Journal of the Optical Society of America A, 24(9): 2737-2747.https://doi.org/10.1364/josaa.24.002737
- Huang, F.M., Yin, K.L., Yang, B.B., et al., 2018. Step-Like Displacement Prediction of Landslide Based on Time Series Decomposition and Multivariate Chaotic Model. *Earth Science*, 43(3): 887-898 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., 2009. Some Catastrophic Landslides since the Twentieth Century in the Southwest of China. Landslides, 6(1): 69-81. https://doi.org/10.1007/s10346-009-0142-y
- Jiang, M., Ding, X.L., Hanssen, R.F., et al., 2015. Fast Statistically Homogeneous Pixel Selection for Covariance Matrix Estimation for Multitemporal InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(3): 1213– 1224.https://doi.org/10.1109/tgrs.2014.2336237
- Jiang, M., Ding, X.L., He, X.F., et al., 2016.FaSHPS-InSAR Technique for Distributed Scatterers: A Case Study over the Lost Hills Oil Field, California. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10):3592-3603 (in Chinese with English abstract).

- Liao, M.S., Jiang, H.J., Wang, Y., et al., 2013. Improved Topographic Mapping through High-Resolution SAR Interferometry with Atmospheric Effect Removal. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80: 72-79.https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.008
- Liu, P., Li, Z.H., Hoey, T., et al., 2013. Using Advanced In-SAR Time Series Techniques to Monitor Landslide Movements in Badong of the Three Gorges Region, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21: 253-264. https://doi.org/ 10.1016/j.jag.2011.10.010
- Qu, T. T., Lu, P., Liu, C., et al., 2016. Hybrid-SAR Technique: Joint Analysis Using Phase-Based and Amplitude-Based Methods for the Xishancun Giant Landslide Monitoring. *Remote Sensing*, 8(10): 874. https://doi. org/ 10.3390/rs8100874
- Shi, X.G., Zhang, L., Balz, T., et al., 2015. Landslide Deformation Monitoring Using Point-Like Target Offset Tracking with Multi-Mode High-Resolution TerraSAR-X Data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 105: 128-140. https://doi. org/10.1016/j. isprsjprs.2015.03.017
- Shi, X.G., Liao, M.S., Li, M.H., et al., 2016. Wide-Area Landslide Deformation Mapping with Multi - Path ALOS PALSAR Data Stacks: A Case Study of Three Gorges Area, China. *Remote Sensing*, 8(2): 136. https://doi.org/ 10.3390/rs8020136
- Shi, X.G., Zhang, L., Zhou, C., et al., 2018. Retrieval of Time Series Three-Dimensional Landslide Surface Displacements from Multi-Angular SAR Observations. Landslides, 15(5): 1015-1027. https://doi. org/10.1007/ s10346-018-0975-3
- Sun, Q., Zhang, L., Ding, X. L., et al., 2015. Slope Deformation Prior to Zhouqu, China Landslide from InSAR Time Series Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 156: 45-57.https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.029
- Tang, P.P., Chen, F.L., Guo, H.D., et al., 2015. Large-Area Landslides Monitoring Using Advanced Multi-Temporal InSAR Technique over the Giant Panda Habitat, Sichuan, China. *Remote Sensing*, 7(7): 8925-8949. https:// doi.org/10.3390/rs70708925
- Wang, F., Yin, K.L., Gui, L., et al., 2018. Risk Analysis on Individual Reservoir Bank Landslide and Its Generated Wave. *Earth Science*, 43(3): 899-909 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F.W., Zhang, Y.M., Huo, Z.T., et al., 2008a. Mechanism for the Rapid Motion of the Qianjiangping Landslide during Reactivation by the First Impoundment of

the Three Gorges Dam Reservoir, China. *Landslides*, 5 (4): 379-386. https://doi.org/10.1007/s10346 - 008 -0130-7

- Wang, F. W., Zhang, Y. M., Huo, Z. T., et al., 2008b. Movement of the Shuping Landslide in the First Four Years after the Initial Impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China. Landslides, 5(3): 321-329.https://doi. org/10.1007/s10346-008-0128-1
- Wasowski, J., Bovenga, F., 2014. Investigating Landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi Temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives. *Engineering Geology*, 174: 103-138. https://doi. org/ 10.1016/j.enggeo.2014.03.003
- Xia, Y., Kaufmann, H., Guo, X. F., et al., 2002. Differential SAR Interferometry Using Corner Reflectors. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 24-28 June 2002, Toronto, Ontario, Canada, 1243-1246.https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025902
- Ye, X., Kaufmann, H., Guo, X.F., 2004.Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-InSAR and Corner Reflectors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10): 1167-1172.https://doi.org/10.14358/ pers.70.10.1167
- Zhao, C.Y., Zhang, Q., He, Y., et al., 2016.Small-Scale Loess Landslide Monitoring with Small Baseline Subsets Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique: Case Study of Xingyuan Landslide, Shaanxi, China.*Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2): 026030.https://doi.org/ 10.1117/1.jrs.10.026030
- Zhu, W., Zhang, Q., Ding, X.L., et al., 2014.Landslide Monitoring by Combining of CR - InSAR and GPS Techniques. Advances in Space Research, 53(3): 430-439. https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.003

附中文参考文献

- 代贞伟,殷跃平,魏云杰,等,2016.三峡库区藕塘滑坡变形失 稳机制研究.工程地质学报,24(1):44-55.
- 丁继新,杨志法,尚彦军,等,2006.降雨型滑坡时空预报新方法.中国科学(D辑),36(6):579-586.
- 黄发明,殷坤龙,杨背背,等,2018.基于时间序列分解和多变 量混沌模型的滑坡阶跃式位移预测.地球科学,43(3): 887-898.
- 蒋弥,丁晓利,何秀凤,等,2016.基于快速分布式目标探测的 时序雷达干涉测量方法:以Lost Hills油藏区为例.地球 物理学报,59(10):3592-3603.
- 王芳,殷坤龙,桂蕾,等,2018.单体库岸滑坡及其次生涌浪灾 害风险分析.地球科学,43(3):899-909.