

论文

# 高分辨率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用

廖明生\*, 唐婧, 王腾, Timo BALZ, 张路

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

\* E-mail: liao@whu.edu.cn

收稿日期: 2010-11-15; 接受日期: 2011-05-22

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB714405)、国家自然科学基金(批准号: 41021061)和三峡库区地质灾害防治重大科学研究项目(编号: SXKY3-6-4)资助

**摘要** 结合当前雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术的发展, 以 TerraSAR-X 数据为例, 重点研究高分辨率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用. 实验结果表明, 利用高分辨率 SAR 影像幅度和差分干涉相位信息, 可以成功地检测到三峡库区滑坡发生所处的时间段、地点以及形变, 验证了高分辨率雷达数据 InSAR 技术进行滑坡检测的有效性. 针对三峡库区大气效应对差分干涉的影响, 应用时间序列 InSAR 技术进行滑坡体的缓慢形变监测, 结果表明滑坡体形变大小和三峡水库的水位变化有一定的关系, 可以为滑坡预警提供重要依据. 高分辨率 TerraSAR-X 数据和中分辨率 ASAR 数据的形变监测结果的分析比较表明, 由于 TerraSAR-X 数据具有较短波长以及较高的时间和空间分辨率, 能够取得更好的形变监测效果, 可以应用于滑坡和泥石流等地质灾害的监测和预警等方面的工作.

**关键词**

滑坡监测  
雷达差分干涉测量  
时间序列分析  
高分辨率

滑坡是指边坡上的岩土体在自然或人为因素的影响下失去稳定, 沿贯通的破坏面整体下滑的现象<sup>[1]</sup>. 滑坡作为一种常见的地质灾害, 分布广, 危害大, 2009 年全国地质灾害通报的统计结果显示滑坡在全部地质灾害中占到了 60%. 滑坡的发生是内外部条件共同作用的结果. 内部条件主要在于滑坡体的地质构造和地貌特征, 例如地层的岩性和地形起伏程度等; 外部条件是诱发潜在滑坡体发生滑坡的主要因素, 包括降雨、地震以及人类的工程活动等.

位于湖北省宜昌市三斗坪的三峡工程, 是世界上综合规模最大的水利水电枢纽工程, 将在防洪、发电和航运等方面发挥巨大的综合效益. 三峡水库正常蓄水位是 175 m, 比原来高出 100 多米, 并且水库水位每年还将会在 145~175 m 之间循环, 这将使得三

峡地区更加易发地质灾害<sup>[2]</sup>. 三峡工程的修建不仅导致库区所覆盖的湖北和重庆两省市 20 个县(市、区)中的 13 个县城需搬迁, 而且造成库区滑坡体数量增多, 老滑坡体复活. 根据国土资源部 2001 年的统计, 三峡库区所覆盖的 20 个县(市、区)境内全部发现滑坡, 共有滑坡体 2490 个. 自三峡水库一期蓄水到 135 m, 到 2003 年 11 月, 整个库区的崩塌和滑坡体数目就达到了 4688 处, 比 2001 年几乎翻了一番. 2010 年 6 月, 三峡库区汛期地质灾害防治工作会议指出, 近两年三峡库区发生地灾 132 起, 紧急转移群众近 2000 人.

秭归县是三峡库区受滑坡等地质灾害影响最为严重的地区之一, 不仅崩滑体数量很多, 而且斜坡的稳定性也很差. 2003 年水库开始一期蓄水后, 秭归地

区出现了大量的滑坡复活及失稳现象<sup>[3]</sup>. 其中 2003 年 7 月 13 日发生的千将坪滑坡是三峡一期蓄水以来最为严重的一次滑坡. 经初步分析, 蓄水引起的水位上涨和连续的暴雨是导致千将坪老滑坡复活的主要原因<sup>[4]</sup>.

目前, 对三峡地区的滑坡形变监测采用多种滑坡监测手段相结合的方法, 包括大地测量、GPS 监测网、遥感影像解译和伸缩计深部位移监测等. 国家重点野外科学观测试验站“长江三峡滑坡监测试验站”以长江三峡工程近坝地段新滩链子崖滑坡崩塌区为中心, 面向三峡库区滑坡进行长期系统的监测. 这些方法在各监测站大都能够获取高精度的形变量测结果, 但是限于人力和物力成本难以实现库区的高密度形变监测.

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式微波传感器, 由于具有全天候、全天时成像的特点, 尤其适用于三峡库区这样的多云多雨地区<sup>[5]</sup>. 利用不同时间对同一目标所成的影像以及地表高程信息, 能够对地表形变进行高精度量测, 即差分干涉测量(D-InSAR)技术. 由于该技术能够实现高精度和大范围的地表形变获取, 因此在地震、火山和矿区沉降等的形变监测方面取得了巨大的成功<sup>[6-8]</sup>. D-InSAR 技术最早用于滑坡方面的监测是在 1996 年, 法国学者 Fruneau 等<sup>[9]</sup>对法国南部的 Saint Etienne de Tin 滑坡首次使用 D-InSAR 技术进行监测, 处理结果与常规离散观测结果吻合程度很高.

但是随着 D-InSAR 技术在形变监测方面应用的不断深入, 以下几个方面原因限制了其测量精度: 1) 空间去相关: 空间基线带来的频谱偏移; 2) 时间去相关: 地表属性的变化; 3) 不同时相的雷达信号在传播过程中受到的大气不一致性影响而造成的大气效应误差; 4) 系统热噪声和数据处理误差等.

为了克服去相关和大气效应对 D-InSAR 应用范围以及处理精度的限制, 意大利学者 Ferretti 等<sup>[10,11]</sup>提出了 Permanent Scatterers InSAR(PS-InSAR)技术, 该技术将注意力集中在时间序列上稳定的永久散射体上. 然后在由 PS 点构成的稀疏图上, 根据地形相关相位、形变相位和大气相位三者不同的时空特性进行分离, 最终得到高精度的形变监测结果. 在此基础上发展起来的相干目标分析和时空网络解缠等方法将常规的 D-InSAR 技术推进到了一个以 PS-InSAR 技术为代表的新阶段<sup>[12]</sup>. 由于该技术能够实现毫米级

的形变量测精度, 在地表微小形变监测方面取得了巨大的成功<sup>[13,14]</sup>. 斯坦福大学的研究小组于 2006 年发布了一套 PS-InSAR 数据处理算法(Stanford Method for Persistent Scatterer, StaMPS), 该算法克服了以前算法中需要事先给出形变模型的限制, 利用三维时空解缠技术获取目标的时序形变信息<sup>[15,16]</sup>.

2001 年, Ferretti 等<sup>[11]</sup>首次应用 PS 技术对 Ancona 地区的滑坡进行形变探测, 结果表明地表形变场速度与地面真实情况相符, 并且 PS 点的形变精度可达到  $1 \text{ mm a}^{-1}$ . 2003 年, Colesanti 等<sup>[17]</sup>将意大利中部 Ancona 滑坡 1992~2000 年间 61 景 ERS SAR 影像的时间序列处理结果与当地水准测量的结果比较证明该结果是可信的, 并且对于植被覆盖的低相干区也能取得较好的结果. Hilley 等<sup>[18]</sup>利用永久散射体的方法研究并分析了滑坡体缓慢的非线性形变过程, 并指出形变速率的大小与降雨等因素有关.

2001 年美国阿拉斯加大学地球物理研究所与中国地震局地震研究所使用欧洲空间局的 ERS 数据开展了 D-InSAR 技术对三峡地区蓄水引起的地表形变的监测, 但是结果并不理想<sup>[19]</sup>. Gao 和 Zeng<sup>[20]</sup>利用 2003~2005 年 11 景万州地区 ASAR 数据进行时间序列 InSAR 处理, 并指出数据量和大气效应限制了 InSAR 数据在该地区的应用. 在欧洲“龙计划”支持下, 武汉大学与意大利米兰理工大学合作, 利用 40 余景 ASAR 数据在三峡坝区和巴东新城开展了基于永久散射体的地面沉降监测研究. 时间序列 InSAR 分析结果表明三峡大坝在数据获取期间仅存在由于水位和温度引起的微小形变, 而在巴东新城区有两个较大的潜在滑坡体<sup>[21-23]</sup>.

在 2008 年以前, 雷达干涉测量所用数据大部分是 ERS 和 ENVISAT ASAR 等 C 波段的中低分辨率数据, 重访周期为 35 天. 在相关研究中, 即使利用部分永久散射体等技术手段提高了量测点密度, 但也由于影像空间分辨率的原因难以对滑坡体形变进行更进一步的分析和解译<sup>[23]</sup>. 随着 2007 年以来一系列高分辨率、短重访周期雷达传感器, 如 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 等的发射<sup>[24]</sup>, 高分辨率 InSAR 数据及相关分析技术使我们能够获得更高空间分辨率和时间分辨率的地表形变量测结果<sup>[25,26]</sup>. 本文的内容主要是基于高分辨率的 InSAR 数据, 研究 D-InSAR 技术在三峡库区滑坡监测中的应用. 实验表明高分辨率的 SAR 数据以及 InSAR 技术在三峡

库区的滑坡形变监测和预警方面具有重要的应用价值.

## 1 D-InSAR/时间序列 InSAR 技术

### 1.1 D-InSAR 技术

D-InSAR 技术的主要步骤包括主从影像的输入以及配准、平地效应的去除、去除地形相位得到差分相位和相位解缠等. D-InSAR 技术根据所用影像数一般有三种方法去除地形相位: 一是选取基线距为零的干涉图像对, 可以直接得到沿视线方向的形变信息; 二是使用目标发生形变前后的两景 SAR 影像生成包含有形变的干涉图, 然后去除该地区对应的外部数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)模拟的地形相位得到地表形变信息, 该方法无需对地形相位解缠, 但不是所有地区都有现势性好的 DEM<sup>[6]</sup>; 三是利用形变前的两景影像与形变后的一景影像生成地形和地形-形变对, 从地形-形变对相位中去除地形的相位数据, 即可得到地表形变相位<sup>[7]</sup>.

### 1.2 时间序列 InSAR 技术

时间序列 InSAR 技术是利用多景同一地区的 SAR 影像, 通过统计分析所用影像的幅度和相位信息, 识别出不受时间和空间去相干影响的永久散射体. 这些永久散射体点构成了一个“天然的 GPS 格网”, 通过对格网点进行时空滤波, 分离出空间相关、时间不相关的大气效应, 然后对分离出的大气相位进行插值拟合研究区域的大气效应贡献值, 达到估计并去除大气效应值, 提高形变监测精度的目的.

与传统 D-InSAR 技术比较, 时间序列 InSAR 技术的优越性在于: 1) 针对稳定点目标的处理能够满足高精度差分干涉的相干性需求; 2) 很大程度上摆脱了时空基线的限制, 提高了可用影像的数目; 3) 采取了比较系统的方法对大气效应进行估计并将其分离出来, 提高了形变监测结果的精度; 4) 因为 PS 点的高程误差在后面的处理会被估计出来, 所以可以接受精度不高的 DEM 作为参考地形数据; 5) 时间序列 InSAR 分析技术为研究长期、缓慢和微量的地表形变提供了可能, 但是一般需要大量的 SAR 影像, 这是该技术的不足.

在城市地区, 由于地表沉降通常比较缓慢, 可以看作是近似线性变化的, 因此通常的 PS 处理也能得

到很好的形变监测结果<sup>[14]</sup>. 但是对于滑坡体来说, 由于其形变与降雨和人类活动等外界因素有很大的关系, 通常形变比较复杂. 另外, 山体滑坡一般发生在人工建筑比较少的地方, 这对于中低分辨率的 SAR 数据和常规的 PS 处理方法来说是一个很大的挑战. 因此, 在本文中我们一方面尝试利用高分辨率的 TerraSAR-X 数据提高 PS 点密度, 另一方面采用更适合获取非线性形变的时间序列 InSAR 分析技术来监测滑坡体的形变, 处理步骤如下<sup>[15,23]</sup>.

(i) 差分干涉. 选择时间序列上的一景影像作为主影像, 然后将其他的影像作为从影像与主影像配准并生成差分干涉图, 采用如下形式来描述差分相位的组成:

$$f_p^{i,k} = f_S^{i,k} + f_B^{i,k} + f_T^{i,k} + f_N^{i,k}, \quad (1)$$

$f_p^{i,k}$  是目标  $P$  在第  $i$  幅干涉图上的差分相位;  $f_S^{i,k}$  是在空间上相关的相位, 主要由大气相位、轨道误差、空间相关的 DEM 误差和地表形变引起;  $f_B^{i,k}$  是和垂直基线相关的相位, 主要是由于入射角的不同造成的;  $f_T^{i,k}$  是时间上相关的相位, 主要是由空间上非相关的地表形变及大气相位的季节性变化引起的;  $f_N^{i,k}$  是噪声相位.

(ii) PS 点的初选. 采用振幅离差的方法选择 PS 候选点.

(iii) 滤除  $f_S^{i,k}$  项. 将所有的 PS 候选点进行地理编码之后, 转换到一个规则格网上, 并保证格网间隔内相位变化较小. 由于该相位组分在空间域上一一定的尺度范围内是相关的, 并且主要分布在低频部分, 所以可以利用低通滤波器滤波得到  $\tilde{f}_S^{i,k}$  并去除. 滤波器的截止频率的选择一般是在 800~1200 m 左右<sup>[27]</sup>.

(iv) 采用线性逆变换的方法从残余相位和垂直基线中估计  $\tilde{f}_B^{i,k}$ . 从差分相位中去除掉空间相关的相位后, 形变相位、大气贡献相位和轨道误差相位的非空间相关部分很小, 剩余的部分主要是和基线相关的相位. 由于此时的相位也是缠绕的, 所以可以采用参数空间粗搜索的方法来估计这部分相位. 通过在一定的高程误差( $\pm 10$  m)对应的相位变化范围内, 选择一定的步长( $\pi/4$ ), 搜索  $\tilde{f}_B^{i,k}$  值使式(2)中  $x_B$  值达到

最大, 即可得到最优的估计值  $\tilde{f}_B^{i,k}$ .

$$x_B = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \exp\{j(f_p^i - \tilde{f}_{Sp}^i - \tilde{f}_{Bp}^i)\} \quad (2)$$

其中,  $M$  表示干涉图的数目,  $x_B$  是一个衡量相位噪声水平以及该像素是否为 PS 点的指标.

得到  $x_B$  的值后, 同时考虑到幅度和相位的稳定性, 采用统计分析的方法选择 PS 点, 并从干涉图中去除  $\tilde{f}_B^{i,k}$ .

(v) 根据时间序列数据的特点采用三维时空解缠的方法突破以往需要先验形变模型的条件. 相位解缠后, 通过滤波滤除大气相位, 最后得到形变相位.

### 1.3 TerraSAR-X 数据在形变监测中的优势

TerraSAR-X 是德国新一代的高分辨率对地观测卫星, 主要荷载是一个 X 波段(波长为 3.1 cm)的合成孔径雷达传感器, 能够提供多模式、多极化和多分辨率的雷达数据供商业和科研使用. 2007 年 6 月 15 日, TerraSAR-X 卫星发射成功, 2008 年 2 月开始向用户正式提供数据服务, 具有精确的姿态和轨道控制能力<sup>[24]</sup>.

理论上, 由于 X 波段的波长差不多, 是 C 波段波长的一半, 对地形表变更灵敏, 因此能测量更加精确的形变. 此外, 短重访周期以及高分辨率的特性使得 TerraSAR-X 数据能够监测到以前 C 波段数据所不能监测到的细节. 由于永久散射体通常对应的是一个像元内对回波信号占主导作用的散射目标, 所以对于高分辨率 SAR 影像来说像元表现出 PS 特性的可能性更大. 事实上, 越高的空间分辨率, 一个像元内出现 PS 点的可能性越大<sup>[28]</sup>.

但是, 相较于 C 和 L 波段数据 X 波段数据在非城区更容易受到植被的影响出现时间失相干, 这主要是由于 X 波段相位对散射变化具有高度敏感性. 但是在原则上, 对人工建筑和裸岩来说, 高分辨率数据提取到的 PS 点会大大增加. 随着新的传感器平台稳定性的增加以及较短的重访周期, 对于两景连续时间获取的数据来说, 时间失相干会大大减小. 另外相位解缠的误差对于 X 波段数据也会更敏感些, 所以要对结果, 尤其是低相干区域的结果进行一致性检查<sup>[28]</sup>.

## 2 试验区 and 试验数据

本文的试验区位于湖北宜昌市秭归县, 地处我国地形第二阶梯向第三阶梯的过渡地带, 川东褶皱与鄂西山在此会合, 多为中低山和侵蚀峡谷地貌, 地势上东高西低. 从试验区的 DEM 可以看出(图 1), 该地区的地形起伏很大, 高程范围 0~3000 m. 该试验区位于黄陵背斜西翼和秭归向斜, 出露地层从志留系到侏罗系, 由东往西地层渐新<sup>[2]</sup>.

本文利用已存档的三峡库区雷达卫星数据 2003~2009 年间的 57 景 ASAR SLC 数据以及 22 景 2008~2009 年的 TerraSAR-X SM 模式数据, 两数据的覆盖范围如图 1. 充分的数据积累为长时间序列 InSAR 数据的分析提供了有利条件, 两数据的基本参数对照见表 1.

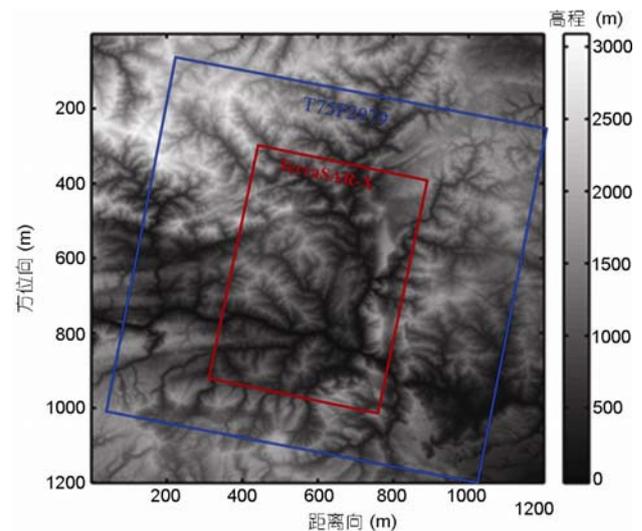


图 1 试验区数字高程模型和试验数据覆盖范围

表 1 试验数据基本参数对照

	ASAR 数据	TerraSAR-X 数据
数据编号	T75F2979	strip_005
飞行方向	降轨	降轨
脉冲重复频率(Hz)	1652	3611
中心入射角	23°	25°
极化方式	VV	VV
方位向采样间距(m)	4	2
距离向采样间距(m)	8	1
影像覆盖范围	109 km × 104 km	30 km × 50 km
波长(m)	0.056	0.031
重访周期(天)	35	11

### 3 结果及讨论

#### 3.1 D-InSAR 分析结果

为了比较 ASAR 和 TerraSAR-X 数据的相干性,我们将同一时间段的雷达影像生成的两幅差分干涉图进行比较,干涉参数见表 2.

从 ASAR 数据差分干涉图的结果(图 2)来看,只有在城镇等人工建筑密集的地方能看出一些条纹,比如图中红色圆圈标注的归州镇,其他地方的相位条纹完全湮没在噪声中.但是在图 3 中,各滑坡体所对应的位置都能清晰可见.另外我们发现新滩、黄阳畔和白水河等滑坡体没有比较明显的形变条纹.另外,在树坪滑坡体角反射器分布的区域,不同分辨率数据的相干图有很大的差别,总体来说前者的相干性要好于 ASAR 数据,这主要得益于 TerraSAR-X 数据的高空间分辨率.另外,为了研究高分辨率数据 D-InSAR 技术在滑坡体探测方面的应用,我们结合幅度信息和差分相位信息来尝试确定滑坡发生的时间段、地点以及滑坡前后的形变大小.

从图 4 所示的该地区幅度影像变化序列中,我们

可以很清楚地发现滑坡所发生的位置.据报道,2008年 8 月 30 日秭归县沙镇溪镇香山路发生滑坡,这与我们利用 TerraSAR-X 数据发现的结果是一致的.另外为描述滑坡发生前后形变的大小,我们分别采用 2009 年 7 月 21 日、8 月 23 日、9 月 14 日和 10 月 17 日的数据进行 D-InSAR 处理分析,这两对数据的垂直基线分别为-31.7 和 20.7 m.差分结果见图 5.

从图 5 中我们可以看出,滑坡体所在的位置在滑坡前有比较大的形变,而在滑坡后该地区趋于稳定.其中蓝色方框所在的位置是千将坪滑坡在 2003 年发生滑坡后其后缘所出现的高达百米左右的陡壁,在幅度影像上可以看出该地方岩体呈现明显的灰白色,在差分干涉图上可以看出该地区有明显的相位条纹,

表 2 秭归差分干涉影像对参数

	获取时间	水位(m)	时间基线(天)	垂直基线(m)
ASAR 数据				
主影像	2009-11-08	170.85	70	-41.6
从影像	2009-08-30	146.32		
TerraSAR-X 数据				
主影像	2009-11-06	170.87	55	-22.9
从影像	2009-09-12	145.26		

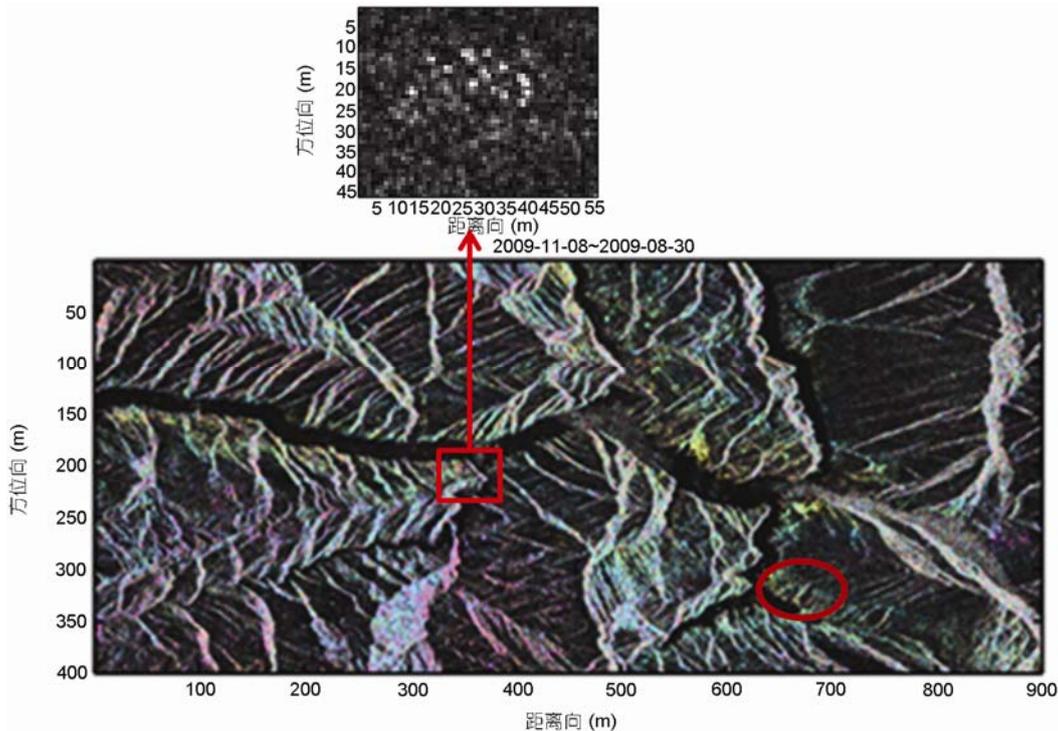


图 2 ASAR 数据幅度影像叠加差分相位

上面的小图为树坪地区角反射器区域的相干图

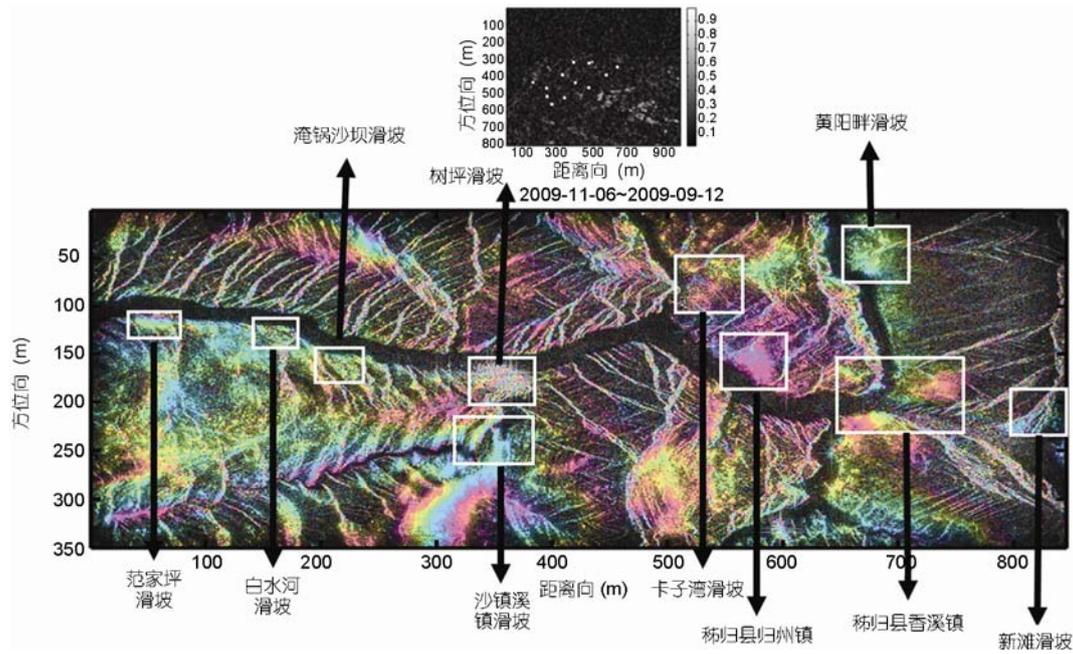


图3 TerraSAR-X 数据幅度影像叠加差分相位

上面的小图为树坪地区角反射器区域的相干图

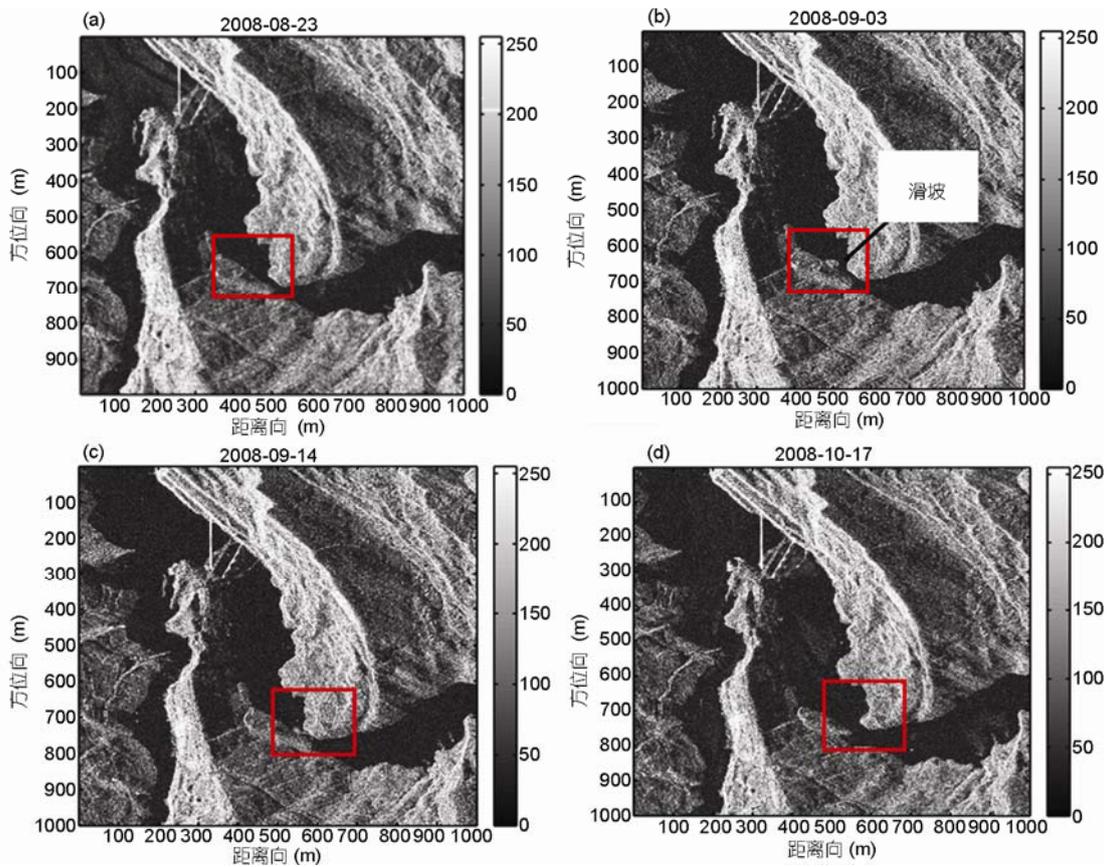


图4 沙镇溪镇滑坡发生前后的幅度影像变化

长江水位: 145.8 m ((a)-(c)), 155.1 m (d)

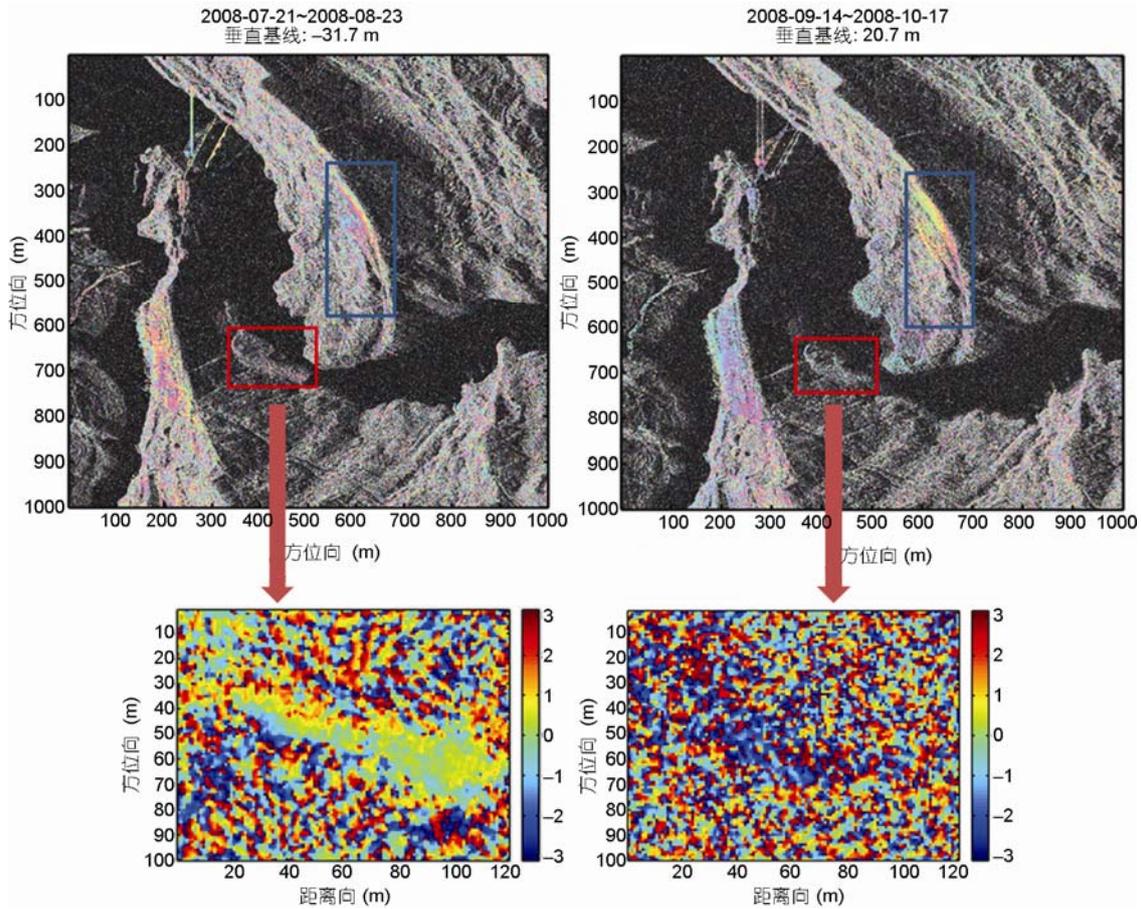


图5 滑坡前后的形变相位

(a) 滑坡前的差分干涉相位; (b) 滑坡后的差分干涉相位

这主要是由于外部 DEM 的时效性不足所致。

### 3.2 时间序列 InSAR 分析结果

#### 3.2.1 ASAR 数据分析结果

在本试验中共使用了 36 景 ASAR 数据, 时间跨度从 2004 年 11 月到 2008 年 12 月, 所截取的影像大小是  $2350 \times 640$ . 实验中所用影像的获取时间以及相对于主影像的空间基线分布如图 6 所示。

在本试验中总共提取了 587 个 PS 点, 平均密度每平方公里不足 5 个. 当选取更多的影像数据时, 由于保持稳定的点目标变少, 提取的 PS 点的分布则更为稀疏. 这对于受大气影响严重、地形复杂的三峡地区来说, 由于无法进行正确的大气相位内插, 地表面形变量测结果的精度会大大降低. 根据前面对高分辨率数据的分析, 我们知道分辨率越高, 探测到点目标的可

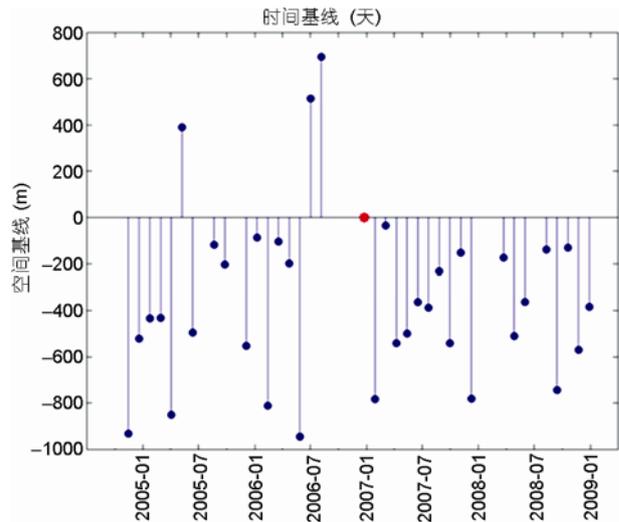


图6 时间序列 InSAR 分析 ASAR 数据时空基线分布

红色圆点表示主影像

能性越大, 提取到的 PS 点数目也越多, 所以选择高空间分辨率的数据是成功获取滑坡体形变的关键. 另一方面时间序列 InSAR 技术可量测的地表形变速率与数据重访周期成反比, 重访周期越长就要求形变越缓慢, 而这不符合滑坡体的形变规律. 因此高分辨率的 TerraSAR-X 数据能够更真实地确定滑坡体的形变过程<sup>[25]</sup>. TerraSAR-X 数据无论在时间还是空间分辨率上相较于 ASAR 数据都有很大的提高(见表 1), 因此下面的试验主要是基于 TerraSAR-X 数据来完成的.

### 3.2.2 TerraSAR-X 数据分析结果

在 ASAR 数据分析的基础上, 我们选取了树坪、白水河和青干河三处滑坡体, 如图 7 中(A)~(C)三处标注的位置, 进行 TerraSAR-X 数据分析试验.

树坪滑坡位于长江右岸秭归县沙镇溪镇, 为一古崩滑堆积体. 滑坡形态为明显的圈椅状, 分布高程为 65~500 m, 纵长 800 m, 横宽 700~900 m, 滑体前缘突入长江, 剪出口高程约 65~68 m. 滑体厚 40~70 m, 体积约  $2600 \times 10^4 \text{ m}^3$ . 滑坡体形态总体呈下陡上缓斜坡, 坡度  $22^\circ \sim 35^\circ$ .

在本实验中总共提取到 633 个 PS 点, 平均密度每平方公里 40 个左右, 能够满足时间序列 InSAR 分析技术的要求. 图 8(a)为树坪滑坡体形变监测的结果, 图中 PS 点的颜色表示形变监测时间段内的年形变速率. 从图 8 中可以看出, 树坪滑坡体上 PS 点的形变速率都不超过  $\pm 2 \text{ mm a}^{-1}$  左右, 这说明该滑坡体在这段时间内并没有太大的形变, 相对来说比较稳定.

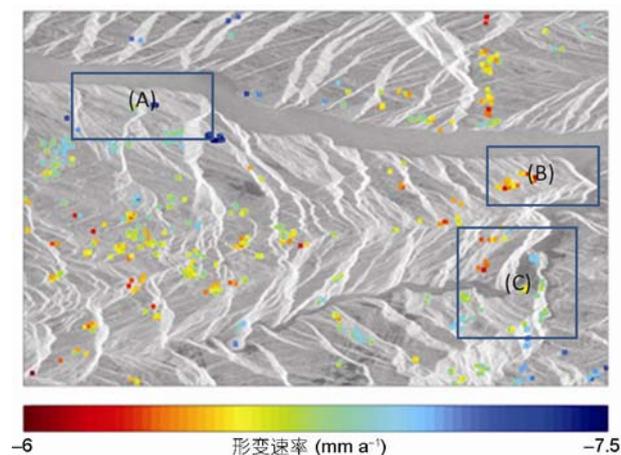


图 7 试验区 PS 点的视线向形变速率

但是从图 8(b)两 PS 点的时间序列形变中可以看出, PS 点的形变大小和长江水位变化有很大的关系. 三峡库区的气候条件属于温湿的中亚热带气候, 降雨主要集中在七八月份, 由于降雨诱发的滑坡等灾害也主要集中在这个时间段, 例如 2003 年 7 月的千将坪滑坡. 另外, 树坪滑坡体是一个古崩滑堆积体, 从 2003 年 6 月三峡开始蓄水以来就陆续展开该地区的形变位移监测, 并不存在较大规模的人类工程活动. 从 PS 点的形变序列和水位剧烈变化的时间来看, 它们具有比较大的相关性. 例如, 对于图中标注的区间 I 时间段内的形变值达到 11.3 mm, 而对于区间 II 缓慢的水位变化并未引起剧烈形变. 另外, 对于区间 III 我们推测是由于水位急剧下降所致. 这是因为水库水位下降时, 由水的冲刷作用而形成的具有临空面的岩土体所受的浮托力迅速减小, 滑坡体所受到的抗滑阻力也迅速减小; 同时由于库水水位突然降低, 而滑坡体地下水排出较慢, 地下水水位下降严重滞后于库水位, 导致库岸内地下水水位高于库水位, 形成较大的动水压力, 加大了沿地下渗流方向的滑动力, 从而引起较大的形变<sup>[29]</sup>.

秭归县白水河滑坡位于长江南岸, 三峡大坝坝址以西 56 km, 属沙镇溪镇白水河村. 滑坡体处于长江宽河谷地段, 为单斜地层顺向坡地形, 南高北低, 呈阶梯状向长江展布. 其后缘高程为 410 m, 以岩土分界处为界, 前缘抵长江 135 m 水位, 东西两侧以基岩山脊为界, 总体坡度约  $30^\circ$ . 其南北向长度 600 m, 东西向宽度 700 m, 滑体平均厚度约 30 m, 体积  $1260 \times 10^4 \text{ m}^3$ . 范家坪滑坡同样位于长江南岸, 在白水河滑坡上游.

从白水河滑坡遥感影像上, 我们知道该滑坡地区植被覆盖很密集. 对于时间序列 InSAR 分析结果, 我们仅在该滑坡体后缘以及东西边界提取到量测目标. 为描述 PS 点在时间上的非线性变化, 我们在滑坡后缘以及东边界选取了 2 个点进行时间序列分析 (#974 和 #1332). 从图 9(b)可以看出, 后缘点除了在 2009 年 4~6 月存在由于水位下降而引起的明显形变, 整个时间段内基本是处于稳定状态. 而边界上的点由于比较靠近长江边缘, 自 2009 年 4 月以来随着水位的涨落产生了较大的形变.

对于范家坪滑坡体来说, 所提取到的 PS 点主要集中在有人工建筑的地方. 图 9(c)描述了建筑物点的形变序列. 根据非线性形变的趋势来看, 建筑物点的

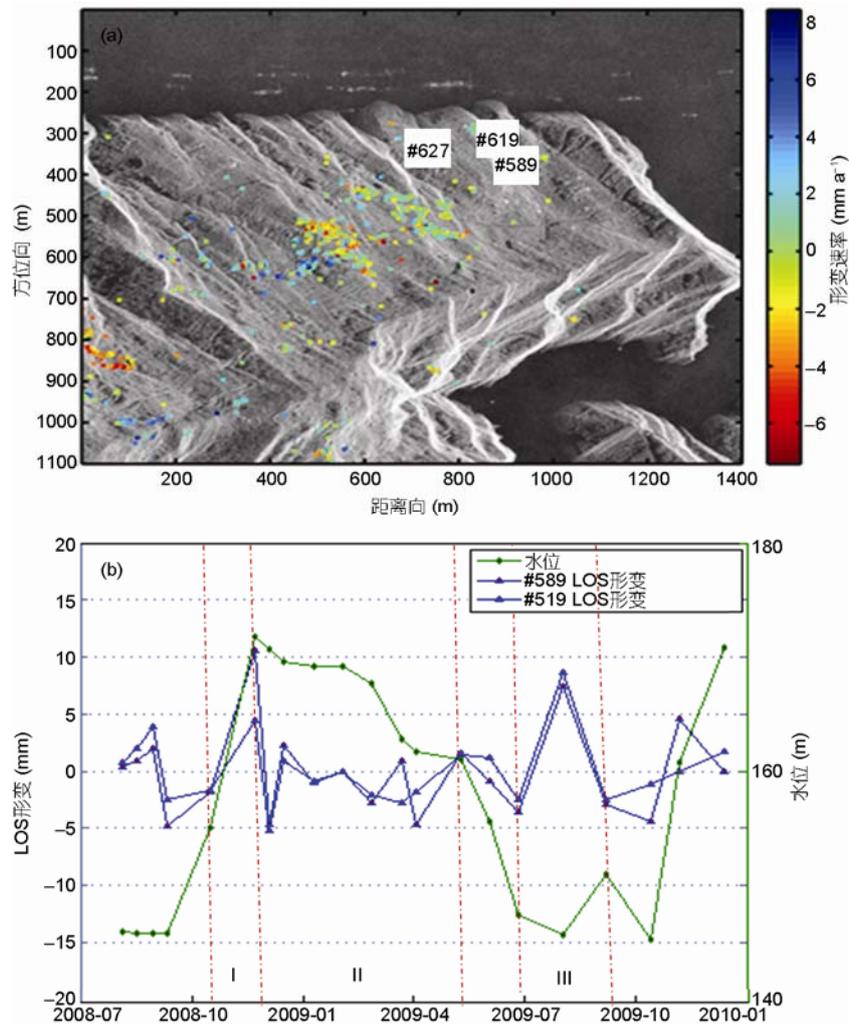


图8 树坪滑坡体 PS 点的视线向形变速率(a)和 PS 点的非线性形变分析(b)

形变主要分为两类,一种是如点#2188,形变的大小与水位有一定的关系,也就是在水位剧烈变化时形变较大,但是整体是处于一种比较稳定的状态;另一种如点#2239,它们的形变与水位的变化没有太大关系,但是整体趋势是形变在逐渐增大,处于缓慢下滑的状态.

卧沙溪滑坡位于秭归县沙镇溪镇梅坪村一组,长江支流青干河右岸,下距位于青干河左岸的千将坪滑坡约 1.5 km. 该滑坡体西南高东北低,滑体后缘高程 405 m,前缘高程 140 m 以下,体积约  $420 \times 10^4 \text{ m}^3$ . 千将坪滑坡体位于秭归县沙镇溪镇千将坪村,地处长江支流青干河的左岸,是一个老滑坡体. 在 2003 年 7 月曾因连续降雨和水库蓄水而发生大滑坡.

图 10(a)是时间序列上 PS 点的视线向形变速率,

图 10(b)和(c)分别是千将坪和卧沙溪滑坡体上 PS 点的形变序列分析. 区间 I 和 II 分别表示三峡水库在不同高度的水位运行时间. 通过对这两个时间段内的两个滑坡体的形变大小分析,可以看出无论水库是在高水位还是低水位运行,都没有发生太大的形变. 对于其他的时间段,则由于水位的上升或是下降引起了滑坡体的较大形变,所以在三峡水库蓄水运行后重点监测的时间段应该是在水位剧烈变化期间. 另外,在图 10(a)中,发现青干河桥头(如图箭头 A 所示)有比较明显的形变,以大约  $8 \text{ mm a}^{-1}$  的形变速率向下移动. 经验证,青干河桥头也靠近一处比较大的滑坡体. 与青干河大桥相连的移民公路整体来说处于比较稳定的状态,形变速率较小. 此外,青干河大桥对岸的一处山体公路上(如图箭头 B 所示),PS 点的

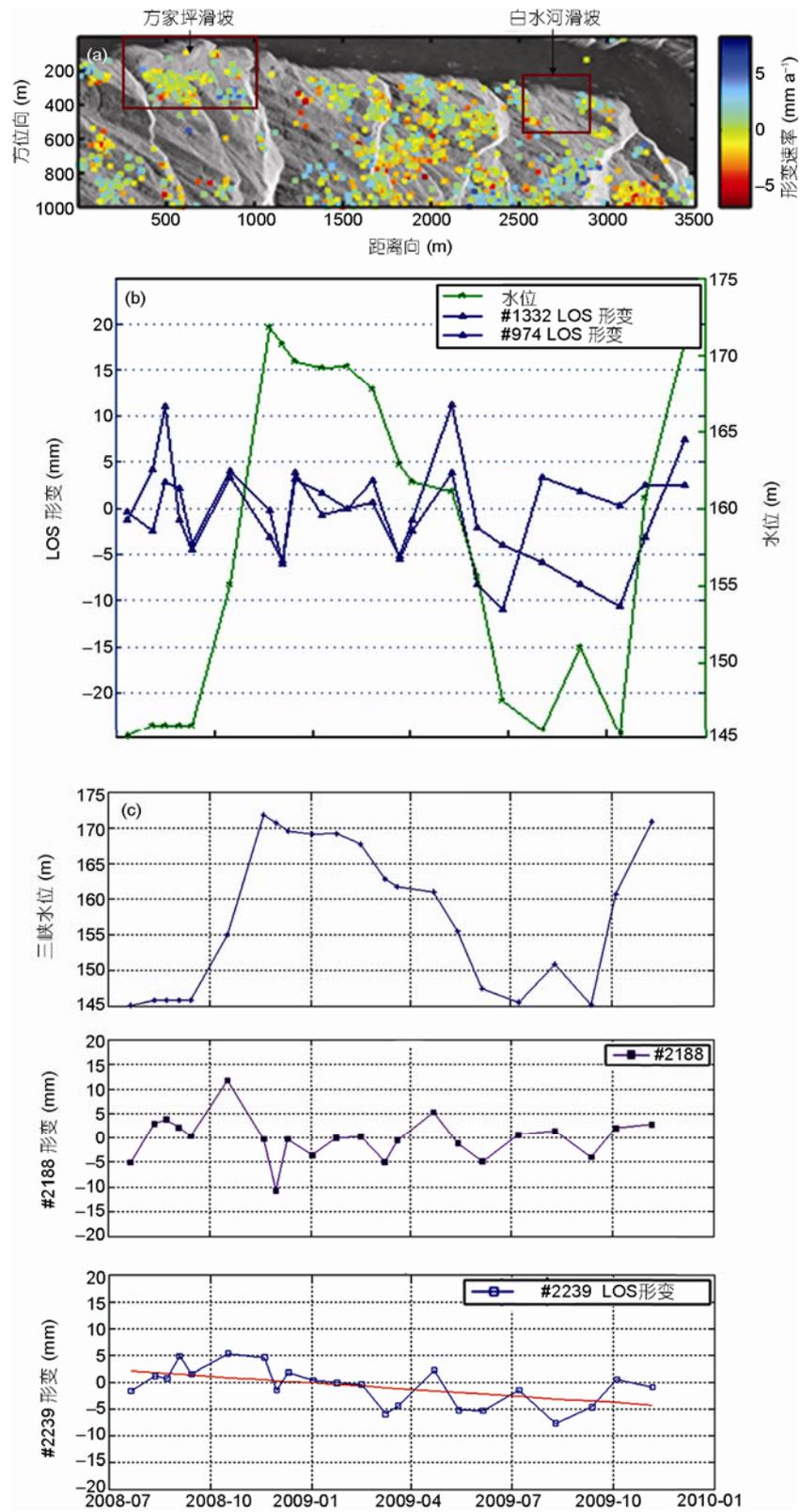


图 9 时间序列 PS 点的视线向形变速率(a)、白水河地区(b)和范家坪滑坡体(c) PS 点形变分析

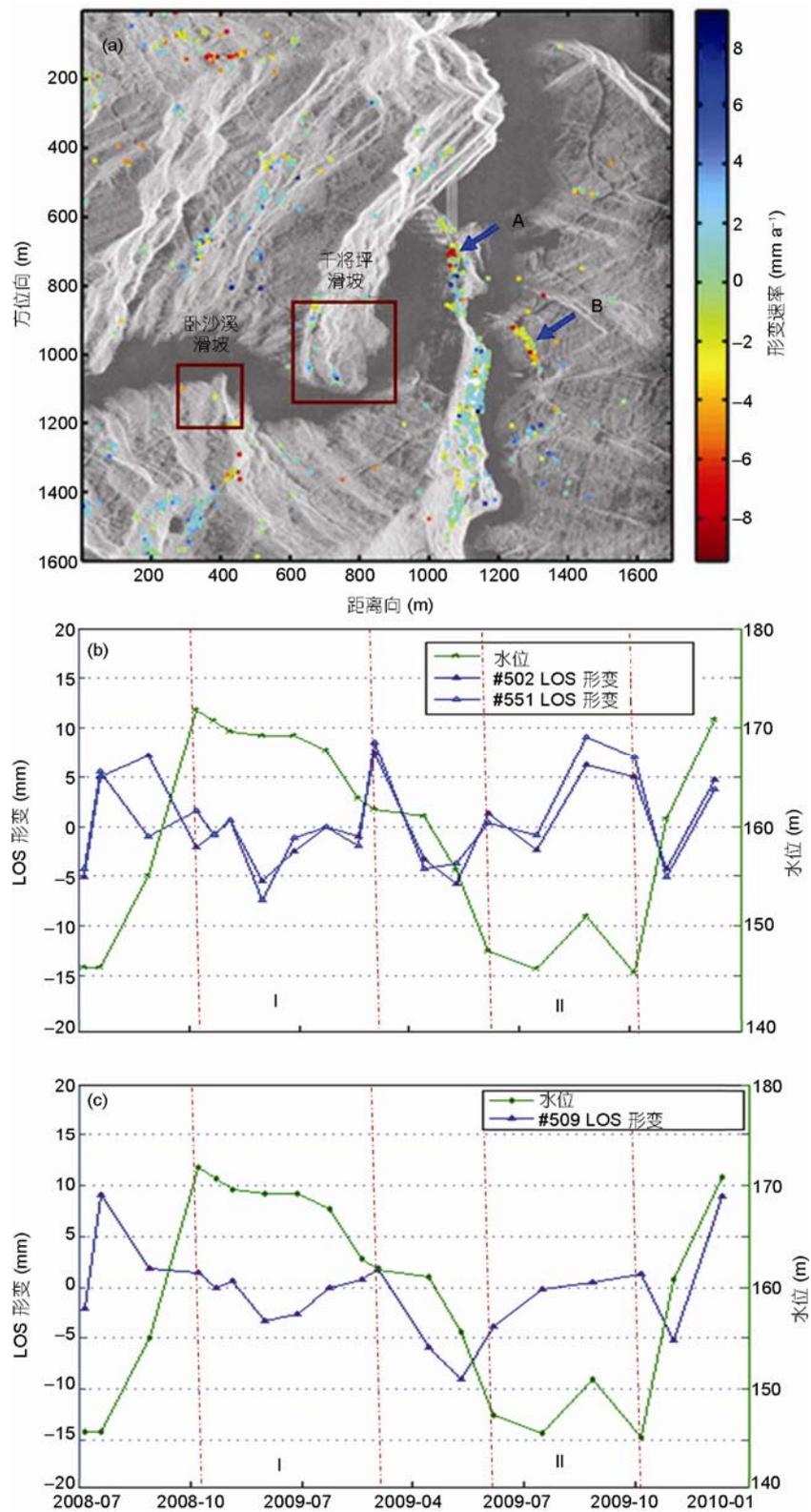


图 10 时间序列 PS 点的视线向形变速率(a)、千将坪(b)和卧沙溪滑坡体(c) PS 点形变分析

形变速率表明该路段有比较大的整体向下移动趋势。

## 4 结论

对于滑坡的形变监测虽然现在有很多比较成熟可靠的方法,但是由于三峡库区特殊的气候环境和复杂的地形条件,以往的研究均难于实现大面积、高密度且连续的形变监测。D-InSAR 技术自从诞生至今,在形变监测方面表现出了巨大的应用潜力,特别是时间序列 InSAR 技术,由于克服了去相干和大气效应等因素的影响,可以实现大面积、长时间和连续的高精度地表形变监测。但是,由于传统中等分辨率 InSAR 数据(如 ERS-1/2 和 ASAR 数据等)在时间和空间分辨率上都难以满足特定滑坡体的形变监测要求,

使得该技术难以在三峡地区开展。

本文的研究表明,结合高分辨率 TerraSAR-X 数据的幅度和相位信息,我们能够确定滑坡发生的位置、时间段以及形变大小。针对三峡库区 InSAR 数据会出现严重的失相干以及大气效应的问题,应用时间序列 InSAR 技术,捕捉到了已知滑坡体上的缓慢形变。实验结果表明,水库无论是在高水位还是低水位运行,滑坡体都不会产生太大的形变。但是,在水位剧烈上升或是下降时,滑坡体的形变一般会随着水位的变化而加剧。通过比较 TerraSAR-X 数据与 ASAR 数据在三峡库区形变监测的结果,证明短重访周期以及较高的像元分辨率能够得到分布更密集的地表形变量测结果,在地质灾害监测与防治工作中具有广阔的应用前景。

致谢 感谢审稿人提出的修改建议。

## 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 579-586
- 2 李烈荣. 长江三峡库区崩滑地质灾害与防治. 国土资源, 2002, 4: 4-7
- 3 彭轩明,张业明,鄢道平,等. 三峡水库蓄水后秭归县几个典型滑坡的变形及监测. 见: 地质灾害调查与监测技术方法现场研讨会文集, 四川巫山县. 2004
- 4 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 湖北省秭归县沙镇溪镇千将坪滑坡. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14: 144
- 5 廖明生,林晖. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003
- 6 Massonnet D, Rossi M, Carmona C. The displacement field of the Landers earthquake mapped by interferometry. *Nature*, 1993, 364: 138-142
- 7 Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry—The Landers earthquake. *Int Geosci Remote Sensing Symp*, Aug, 8-12, 1994. 286-288
- 8 单新建,马瑾,王长林,等. 利用星载 D-INSAR 技术获取的地表形变场提取玛尼地震震源断层参数. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 837-844
- 9 Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-tinee landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 1996, 265: 181-190
- 10 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38: 2202-2212
- 11 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 8-20
- 12 Kampers B M. Radar Interferometry Scatterer Technique. Heidelberg: Springer, 2006. 43-66
- 13 Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 1142-1153
- 14 王艳,廖明生,李德仁,等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场. 地球物理学报, 2007, 50: 598-604
- 15 Hooper A J. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation. PhD Thesis. Stanford: Stanford University, 2006
- 16 Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L16302.1-L16302.5
- 17 Colesanti C, Ferretti A, Prati C, et al. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Eng Geol*, 2003, 68: 3-14

- 18 Hilley G E, Burgmann R, Ferretti A, et al. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 2004, 304: 1952–1955
- 19 游新兆, 李澍菝, 杨少敏, 等. 长江三峡工程库首区 InSAR 测量的初步研究. *地壳变形与地震*, 2001, 4: 58–66
- 20 Gao L, Zeng Q M. Terrain deformation monitoring in Three Gorges Area using Permanent Scatterers SAR Interferometry. In: *Proceedings, ScanGIS'2007*. 2007
- 21 Wang T, Perissin D, Liao M S, et al. Deformation monitoring by long term D-InSAR analysis in three gorges area, china. In: *2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium—Proceedings, July 6, 2008–July 11, 2008*. Boston: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008
- 22 王腾, Liao M S, Perissin D. InSAR coherence-decomposition analysis. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 156–160
- 23 Wang T, Perissin D, Rocca F, 等. 基于时间序列 SAR 影响分析方法的三峡大坝稳定性监测. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 110–123
- 24 廖明生, 田馨, 赵卿. TerraSAR\_X/TanDEM\_X 雷达遥感计划及其应用. *测绘信息与工程*, 2007, 32: 44–46
- 25 Wegmuller U, Walter D, Spreckels V, et al. Nonuniform ground motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 895–904
- 26 Baran I, Stewart M, Claessens S. A new functional model for determining minimum and maximum detectable deformation gradient resolved by satellite radar interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 675–682
- 27 Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J Geophys Res*, 1997, 102: 7547–7563
- 28 Prati C, Ferretti A, Perissin D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observation. *J Geodyn*, 2010, 49: 161–170
- 29 陈涛. 三峡水库运行过程中库岸大型滑坡稳定性演变趋势研究. 重庆: 重庆交通大学出版社, 2009