

差分干涉合成孔径雷达技术在广域滑坡动态辨识上的实验研究

王桂杰^{1,2)} 谢谟文¹⁾ 邱 骋¹⁾ 吴维伦¹⁾ 黄洁慧¹⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 中国地质环境监测院, 北京 100081

通信作者, E-mail: movenxj@ustb.edu.cn

摘 要 通过 ALOS 卫星 PALSAR 传感器获得的三景合成孔径雷达 (SAR) 数据, 利用合成孔径雷达差分干涉 (D-InSAR) 技术对金沙江下游乌东德水电站库区内的滑坡活动进行了详细的研究, 获得研究区域内地表高精度形变位移值. 将其按滑动速率及位移大小进行分级显示, 清晰地表明了研究区内不同区域的地面活动位移状态, 辨识出研究区内可能发生滑动和发生滑动较大的区域, 从而确定了滑坡活动的风险区. 对库区内正处活动状态的 L1R-6 号滑坡进行了详细的研究. 结果表明: D-InSAR 技术与全球定位系统 GPS 在监测整体形变和运动趋势上基本一致. 对 D-InSAR 结果存在的单点误差进行了分析, 提出了 D-InSAR 与 GPS 相融合的栅格函数误差插值消减法, 提高了 D-InSAR 技术的监测精度.

关键词 合成孔径雷达 (SAR); 滑坡; 遥感; 监测; 全球定位系统 (GPS)

分类号 TP79

Experiment research of D-InSAR technique on identifying landslide moving in a wide area

WANG Gui-jie²⁾, XIE Mo-wen¹⁾, QIU Cheng¹⁾, WU Wei-lun¹⁾, HUANG Jie-hui¹⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) China Institute of Geoenvironment Monitoring, Beijing 100081, China

Corresponding author, E-mail: movenxj@ustb.edu.cn

ABSTRACT Based on three frame synthetic aperture radar (SAR) data derived from ALOS satellite sensor PALSAR, a three-pass differential SAR interferometry (D-InSAR) technique was used to analyze landslide activities in the Wudongde Hydropower Reservoir area at lower Jinsha River, and high accuracy ground displacement values were acquired by this method. The classification of these ground displacement values by sliding velocity and displacement clearly illustrated the ground activity deformation states of various zones in the studied area were clearly obtained, determined some potential moving landslides and active landslides and identified the dangerous zones of landslides. For an active landslide numbered No. L1R-6, the deformation detected by D-InSAR analysis shows an accordance tendency with the one by global positioning system (GPS) monitoring. In the end, single-point errors which existed in the result of D-InSAR technique were analyzed and a grid function error interpolation method of D-InSAR and GPS was proposed to improve the monitoring accuracy of D-InSAR technique.

KEY WORDS synthetic aperture radar (SAR); landslides; remote sensing; monitoring; global positioning system (GPS)

滑坡是一种常见的自然地质灾害, 给国家建设和人民生命财产造成巨大损失. 对滑坡的监测、预报和早期防治一直是世界各国广泛关注和研究的问题. 传统上对滑坡的监测和预警主要采用钻孔倾斜仪、位移计和自动伸缩计等现场仪器观测, 以及利用

全球定位系统 (GPS)、时域反射法 (time domain reflectometry, TDR) 技术和分布式光纤等电子远程监测技术等. 这些技术的优点是单点监测精度高, 但无法满足人员难以进入的区域以及广域大面积区域的地面活动监测需要. 随着合成孔径雷达干涉

(synthetic aperture radar interferometry InSAR)技术的发展, 合成孔径雷达差分干涉 (differential synthetic aperture radar interferometry D-InSAR)技术正好能够解决连续大面积上非常小的地面活动监测, 而且具有高精度、高分辨率、全天候、监测成本低以及能够监测人员无法进入的区域等优点, 是非常具有潜力的地面活动辨识和监测技术, 成为滑坡、沉降、地震和火山等地质灾害活动调查监测实践应用上的研究热点. 20世纪 90年代以来, 在滑坡监测领域的研究和应用中已有许多报道^[1-9]. 1995年 Achach等^[1]首先将 D-InSAR技术应用在大规模小位移的滑坡监测上, 获得了与地面监测相同精度的结果. 1996年 Fruneau等^[2]获得了 La Clapiere滑坡位移活动的范围, 揭示了整个滑坡的滑动趋势及地面不连续监测不能监测到的滑坡上小规模的不稳定性. 1999年 Vèmeje等^[3]也对 La Valette附近的滑坡进行了位移的提取, 获得了与地面监测相一致的 1.2 cm d^{-1} 的位移精度. 2000年 Rizzo等^[4]揭示了 Randazzo滑坡整个滑坡体的形变位移状态. 2003年 Paol等^[5]对 Maratea Valley内的滑坡进行了研究, 获得了 D-InSAR GPS及电子测距仪 EDM三种监测基本相一致的结果, 并在此基础上提出了调查期间内滑坡的不稳定模型. 2003年 Squarzon等^[6]也对 La Valette滑坡进行了研究, 从 15幅差分干涉图中推演出滑坡的位移值, 得到了与地面监测相一致的结果. 2006年 Colesant等^[7]对 Liechtenstein AP滑坡进行了研究, 得出了 D-InSAR技术最具吸引力和最可靠的优势就是对广域区域上稳定与不稳定区域的定性辨识, 以及大地质灾害的危险区定性划分和对缓慢滑坡上不同滑动速率区域的辨识. 2006年与 2008年, Singhroy等^[8-9]利用 D-InSAR技术分别对老滑坡和冻融性滑坡活动进行了研究, 都取得了较好的结果. 但是, 目前我国利用 D-InSAR技术在滑坡方面研究的应用实例还很少.

1 D-InSAR技术基本原理和处理流程

1.1 D-InSAR技术的基本原理

合成孔径雷达差分干涉 (D-InSAR)技术, 是通过将 SAR数据的处理将同一场景与地形和形变有关的两幅干涉 SAR图像的相位差转变为地表微小形变值的技术. 两幅干涉 SAR图像是由形变前的一帧单视复数 (SLC) SAR数据和形变后的一帧单视复数 (SLC) SAR数据, 分别与选定的 SLC主影像数据进行精确的配准和干涉产生的. 形变前的单视复数数据与主影像形成的干涉 SAR图像仅包含地形

相位项, 形变后的单视复数数据与主影像形成的干涉 SAR图像既包含地形相位项又包含形变相位项, 利用已知的卫星轨道数据和地形数据 (如已知的 DEM)能够很容易去除地形相位项, 差分后只剩下与地表形变有关的相位项, 然后将其转变为微小形变值. 其测量精度为其所用电磁波波长的量级, 因此在微波频率范围内可达到厘米级的精度^[5], 与永久散射体 PS技术及 GPS技术等结合, 精度可达到毫米级^[10].

D-InSAR技术根据其消除地形相位的方法不同, 主要分为 DEM的两轨法、三轨法和四轨法, 它们的原理是基本相同的. 本文采用三轨法, 其基本原理如图 1所示^[11].

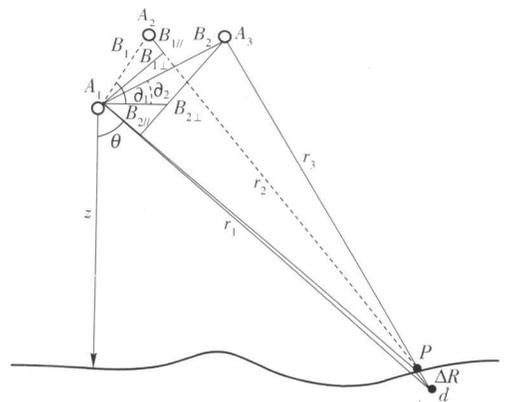


图 1 三轨法差分干涉测量成像几何示意图
Fig 1 Geometrical sketch of three orbit D-InSAR

A_1 , A_2 和 A_3 是卫星三次对同一地区成像的位置, r_1 , r_2 和 r_3 为卫星三次成像位置到地面监测点 P 的距离, B_1 和 B_2 分别为卫星在 A_1 , A_2 及 A_1 , A_3 位置成像时的空间基线, q 和 q' 分别为 B_1 和 B_2 与水平向倾角, θ 为传感器电磁波的入射角, $B_{1//}$, $B_{1\perp}$ 和 $B_{2//}$, $B_{2\perp}$ 分别为基线 B_1 和 B_2 沿视线向的平行和垂直分量. 由图中几何关系及 $B_1 \ll r_1 + r_2$ 可得

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + B_1 - 2r_1 B_1 \cos\left\{\frac{\pi}{2} - \theta + q\right\} \Rightarrow \\ r_2 - r_1 &\cong B_1 \sin(\theta - q) \cong B_{1//} \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1)表明用干涉测量法所得到的相位差与视线方向的基线分量成正比. 这里设定在 A_1 处获得第一幅影像且为主影像, 假设在地表未发生形变前在 A_2 处获取第二幅影像, 所以第二幅影像与 A_1 处的主影像形成的干涉 SAR图像, 其干涉相位差仅包含地形信息, 即两次对地面同一点 P 成像的干涉相位差 $\Delta\phi_{12}$ 可表示为

$$\Delta\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \rho (r_2 - r_1) =$$

$$-\frac{4\pi}{\lambda} B_1 \sin(\theta - \varphi_1) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{1//} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\phi_{12}}{\Delta\phi_{13}} = \frac{B_{1//}}{B_{2//}} \quad (4)$$

式中， ϕ_1 和 ϕ_2 分别为卫星在 A_1 和 A_2 处对地面点 P 成像的相位值， λ 为微波波长，星载重复轨道 $\rho = 2$ 。假设发生形变后在 A_3 处获取了第三幅影像，所以第三幅影像与主影像形成的干涉 SAR 图像的干涉相位差，既包含地形信息又包含地表形变信息。且由于获得的影像间要求基线足够小，所以可近似看作 θ 不变，即此时 A_1 和 A_3 两次对地面同一点 P 成像的干涉相位差位差 $\Delta\phi_{13}$ 可表示为：

$$\Delta\phi_{13} = \phi_1 - \phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \rho (r_3 - r_1) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_2 \sin(\theta - \varphi_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{2//} \quad (3)$$

由式 (2) 和 (3) 得：

假设 ΔR_d 为视线向形变量，则由式 (2) ~ (4) 推得由视线向形变量引起的干涉条纹图相位差 $\Delta\phi_d$ 可表示为

$$\Delta\phi_d \approx \Delta\phi_{13} - \Delta\phi_{12} = \Delta\phi_{12} \left(1 - \frac{B_{2//}}{B_{1//}} \right) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_d \quad (5)$$

式 (5) 左边的各量可由干涉条纹图的相位和轨道参数计算得到，进而可确定影像每点的视线向形变量 ΔR_d ，分解后得到水平形变量和垂直形变量。

1.2 D-InSAR 技术的数据处理流程

三轨法是指采用卫星三次成像的三景数据进行分析，其数据处理流程如图 2 所示。具体包括以下几个过程。

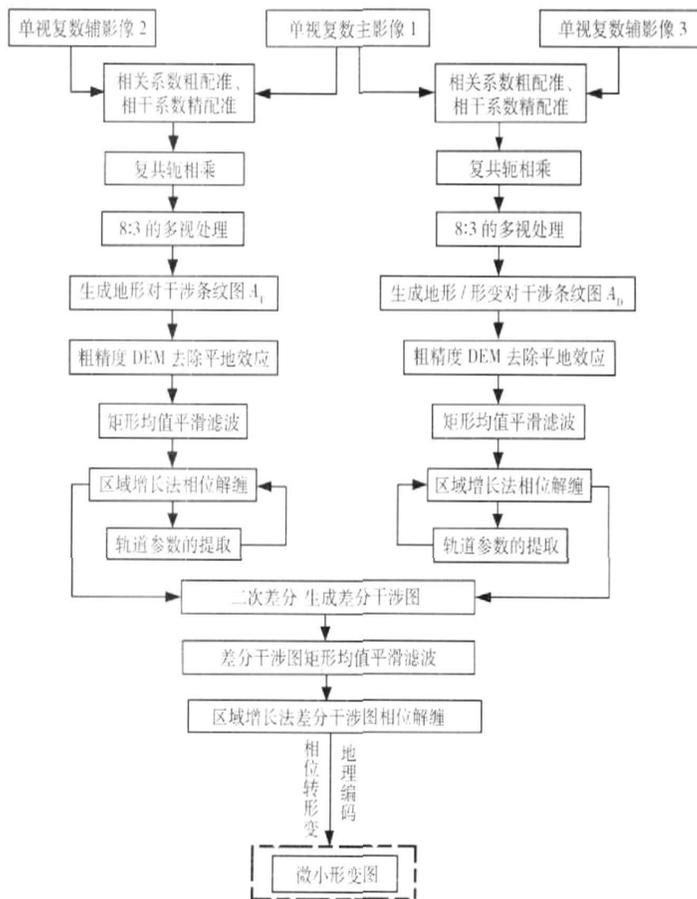


图 2 D-InSAR 技术三轨法数据处理流程

Fig. 2 Flow chart of D-InSAR data processing

(1) 选择合适的雷达卫星数据，并转换为干涉处理的单视复数 (SLC) 数据。处理过程中首先必须将获得的卫星原始数据经聚焦处理为 SLC 数据，作为后期处理的输入数据，本研究获取的是已处理好的单视复数 ALOS 卫星数据。

(2) 选择合适的 SLC 地形数据对和地形形变数据对。为了保证数据的分析质量需要首先对单视复数对进行基线的预估计，根据预估计的时间基线、空间基线和多普勒频移差来选取数据对及确定主辅图像。对三轨差分干涉主要考虑时间基线和空间基

线,原则上时间基线最好小于 6 个月, PALSAR 传感器空间基线要小于 1 200 m (越小相关性越好, 所得结果也更精确些)。对于地形数据原则上要求有较短的时间基线, 而地形形变数据对要求具有较短的空间基线。

(3) 对选好的地形和地形形变数据对进行 SLIC 主辅图像的精确配准。SAR 的 SLIC 数据是由离散的像素构成, 这些像素是对目标地面特性的离散点取样。D-InSAR 技术要依据地面上同一目标点在两次成像中的相位差, 因此必须要掌握地面每一目标点在两次成像中的对应位置。只有使一次成像中各像素对应在地面上的离散样点与另一次成像的各像素对应在地面上的离散样点正好完全重合, 才可以用两次成像中位置相同的各像素构成的像素对来求取地面上每一样点在两次成像间的相位差。因此, 在干涉图生成之前必须进行主辅图像的像素配准。

(4) 地形和地形形变数据对干涉条纹图的生产。在完成数据配准之后, 将主、辅图像对应像元复数值进行共轭相乘:

$$u_m = \psi \psi^* = |\psi| e^{i\phi_1} |\psi| e^{-i\phi_2} = |\psi| |\psi| e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \quad (6)$$

式中, $\psi = |\psi| e^{i\phi_1}$, $\psi^* = |\psi| e^{-i\phi_2}$, ψ^* 表示 ψ 的共轭复数。

把所得复数 u_m 的相位信息单独显示出来称为干涉相位图或干涉图。 u_m 的相位信息是主、辅图像每一同名点上的相位差, 在干涉图上用相位主值 $[-\pi, \pi)$ 显示出来, 这个相位称为缠绕相位。

由于原始数据在方位向上像元分辨率高于斜距方向的分辨率, 在未进行多视处理的 SLIC 图像中其方位向和距离向按其分辨率显示, 则两个方向的比例尺不一致, 图像被拉伸变形, 显示比例差别较大。为了使显示出来的影像与地形图对照时同名地物形状基本一致及对干涉条纹进行显示和评估, 在干涉条纹图生成之后需要进行多视处理。多视处理即按某一比例作压缩处理。例如按方位向与距离向之比为 8:1 压缩, 压缩后原始数据中方位向八行变为一行, 距离向三列变为一列。

(5) 干涉平地效应的去除和滤波。干涉条纹图上的相位由两部分组成, 一是地形的相对高度及地表形变引起的相位成分, 另一部分是由平地效应引起的。平地效应是指平地相位在干涉条纹中所表现出来的随距离和方位的变化而呈周期性变化的密集

条纹现象。平地效应的存在, 使干涉条纹过于密集, 加大了相位解缠的难度, 因此必须采用精确的轨道数据和已知的辅助 DEM 予以去除。即去除后的地形干涉条纹图仅含有地形相位项, 地形形变干涉条纹图只含有地形相位项和形变相位项。另外在干涉图形成过程中会有许多原因产生干涉相位噪声, 所以在平地效应去除后还要进行滤波处理。

(6) 相位解缠。上面干涉条纹图的生成已经提到, 干涉图上的相位为 $[-\pi, \pi)$ 主值范围内的相位差值, 要把它表现为实际真实的相位值必须进行相位解缠, 展开为每点的真实相位。

(7) 二次差分产生差分干涉图。将解缠后的地形形变干涉条纹图与地形干涉条纹图进行差分, 消去地形相位项, 得到只含地表形变项的差分干涉图, 并对差分后的差分干涉图也进行滤波、解缠等处理。

(8) 提取轨道参数、相位信息转换为形变信息、地理编码。最后利用提取的轨道参数将相位信息转化为形变信息并进行地理编码, 得到研究区域地表的微小形变图。

2 滑坡动态辨识实验研究

2.1 研究区域和数据

研究区域位于四川省金沙江流域下游乌东水电站库区, 如图 3 所示。整幅数据研究区 (底图为 Google Earth 影像截图) 中的紫色线框内的区域为获取的整景 SAR 数据的区域; 绿色线框内为 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 的主研究区域, 即主研究区域详图 (底图为 SPOT5 与 1 2000 的高精度航片融合的影像); U1R-6 号滑坡 (底图为航测影像立体视图) 为主研究区域中对水库正常运营有重要影响的正处活动状态的滑坡。

本文所用的数据为 ALOS 卫星 PALSAR 传感器获得的三帧升轨 SAR 数据, 其极化方式为水平极化 (HH) 且分辨率为 6.25 m 波长采用的是 23 m 的 L 波段, 其数据参数如表 1 所示。按前面处理流程中所叙述的原则将编号为 ALPSRP104820510 (2008-01-12) 数据作为主影像。选取 ALPSRP104820510 (2008-01-12) 和 ALPSRP111530510 (2008-02-27) 作为地形数据对, ALPSRP104820510 (2008-01-12) 和 ALPSRP118240510 (2008-04-13) 作为地形形变数据对。将 30 m 分辨率的 ASTER DEM 与等高线生成的 2.5 m 分辨率 DEM 镶嵌后的数字高程数据作为数据处理过程中的辅助 DEM。

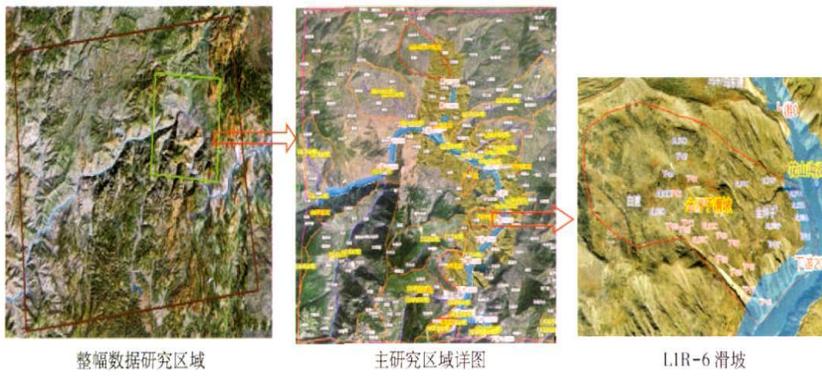


图 3 滑坡研究区域

Figure 3 Studied area of landslides

表 1 所用 ALOS PALSAR 卫星的数据参数

Table 1 Parameters of ALOS PALSAR

像对编号	卫星传感器	景编号	获取日期	时间间隔 /d	垂直基线 /m	多普勒频移差 /Hz	模糊度高度 /m
A_T	ALOS PALSAR	ALPSRP104820510	2008-01-12	46	438 883	-14. 625	131. 471
	ALOS PALSAR	ALPSRP111530510	2008-02-27				
A_D	ALOS PALSAR	ALPSRP104820510	2008-01-12	92	813 466	-33. 191	70. 931
	ALOS PALSAR	ALPSRP118240510	2008-04-13				

2.2 微小形变位移图的产生

选定的地形数据对 A_T 及地形形变数据对 A_D 经配准、复数共轭（干涉）和多视处理后，得到如图 4 所示的初始干涉条纹图。由图可明显看到由于时间引起的失相关及垂直基线距等原因，46 d 的地形对干涉条纹图 A_T 明显好于 92 d 的形变对干涉条纹图 A_D 。

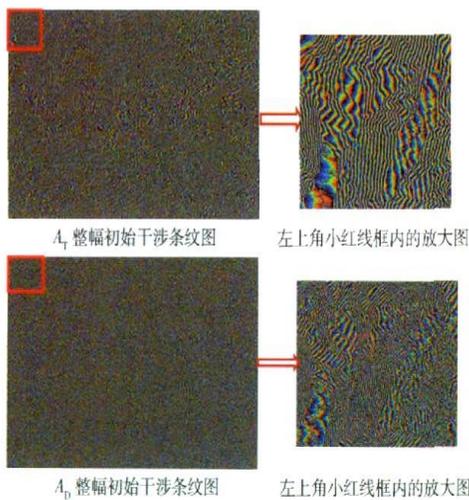


图 4 初步形成的干涉图

Figure 4 Initial interferogram

为了去除干涉图中由平地效应而引起的较密集均匀的小干涉条纹以及干涉中产生的各种噪声影响，对产生的干涉条纹图进行整平和滤波处理。经

过处理后的干涉条纹图则仅含地形和形变相位信息，如图 5 所示。从图 5 可看出去除平地效应和滤波后的干涉图，不仅将均匀密集的小条纹去除而且干涉条纹较清晰。

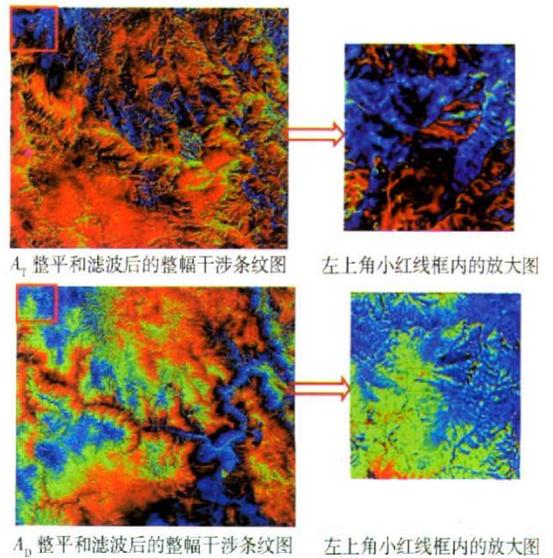


图 5 整平和滤波后的干涉图

Figure 5 Interferogram after flattening and filtering

另外，在干涉处理过程中主辅图像的相干性好坏，是影响数据质量和结果精确与否的重要因素。相干系数是衡量相干性好坏的标准。图 6 为干涉数据对 A_T 和 A_D 的相干系数图，其为 [0, 1] 间的值。相

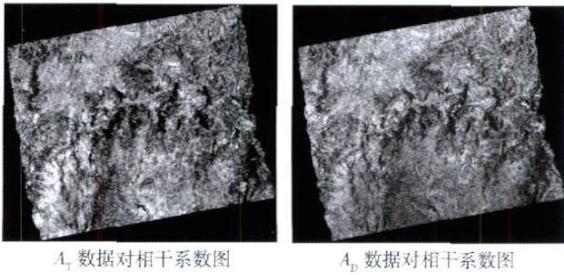


图 6 相干系数图
Fig 6 Map of coherence coefficient

干系数值大的点,说明干涉数据对在此点的相干性好即形变结果较精确,图中用灰度图来显示越亮的地方相干系数越大.

将去除平地效应、滤波后的干涉相位图进行相位解缠、二次差分和轨道精化等处理.最后,将相位信息转换为形变信息并地理编码得到沿卫星视线向的微小形变图.将微小形变位移图转换为沿垂直方向和水平方向的位移图,并根据滑动位移的移动速率及位移的大小进行分级处理即得到各个区域的滑动位移情况.如图 7 所示,在整个研究区域形变图中的四边形区域为主研究区域,不规则的多边形区域为 2.5 m 分辨率 DEM 镶嵌的区域,图中红色区域为抬升区域,绿色区域为沉降区域.因为滑坡的滑移主要伴随的是地表沉降,因此这里主要研究沉降区域.

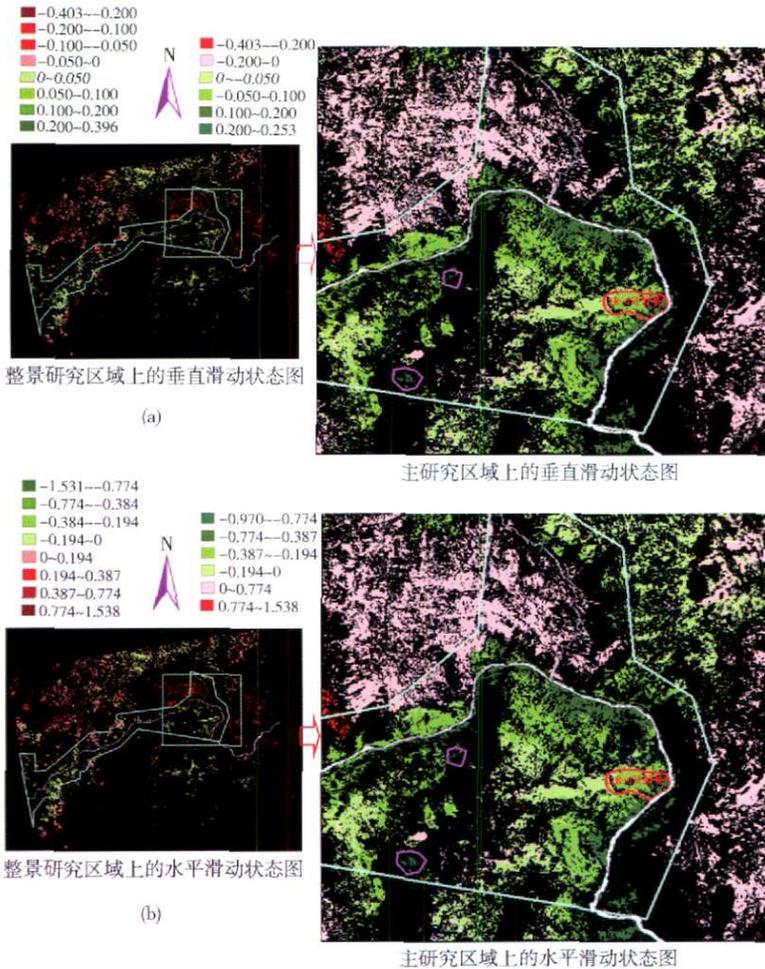


图 7 研究区域滑动位移状态分级图(单位: m). (a) 研究区域 92 d 的垂直滑动状态图; (b) 研究区域 92 d 的水平滑动状态图
Fig 7 Deformation maps of the studied area (unit: m). (a) 92 d vertical deformation map (b) 92 d horizontal deformation map

在主研究区域垂直滑动位移形变状态图中,将抬升区域由位移值大小按红色由浅到深划分为 0 ~ 0.2 m 和大于 0.2 m 的两个区域.将垂直沉降滑动位移值按移动速率及位移大小按绿色由浅到深划分

为滑动速率为 0 ~ 0.0167 m 月⁻¹ (位移值为 0 ~ 0.05 m)、滑动速率为 0.0167 ~ 0.0334 m 月⁻¹ (位移值为 0.05 ~ 0.1 m)、滑动速率为 0.0334 ~ 0.0667 m 月⁻¹ (位移值为 0.1 ~ 0.2 m) 以及滑动速率大于

0.0667 m³月⁻¹ (位移值大于 0.2 m) 的四个区域来显示. 在水平滑动位移形变状态图中, 按水平位移与垂直位移所成比例的倍数, 将抬升区域由水平位移绝对值大小按红色由浅到深划分为 0~0.774 m 和大于 0.774 m 两个区域. 将沉降区的水平位移按移动速率绝对值及位移绝对值大小也进行相同的划分, 按绿色由浅到深划分为滑动速率为 0~0.0647 m³月⁻¹ (位移值为 0~0.194 m)、滑动速率为 0.0647~0.129 m³月⁻¹ (位移值为 0.194~0.387 m)、滑动速率为 0.129~0.258 m³月⁻¹ (位移值为 0.387~0.774 m) 以及滑动速率大于 0.258 m³月⁻¹ (位移值为大于 0.774 m) 的四个区域. 其中水平位移是指南北向的水平位移, 图中向南符号为负, 向北符号为正. 形变图中沉降区域的垂直和水平位移分级图之所以按着一定的所成比例来划分, 是因为得到的研究区域的滑动位移是按着沿卫星视线向的形变, 根据卫星侧视倾角和轨道参数分解而得到的, 所以相同区域的水平位移值与垂直位移值具有基本相同的比例系数, 因而图中水平形变分级图和垂直形变分级图的变化区域是基本相一致的, 水平形变分级图仅反映了其水平滑动的速率和位移大小趋势.

从研究区域的滑动形变位移图可知, 其沉降区域最大滑动位移值为 25.3 m 由于所用 ALOS 卫星 PALSAR 传感器的波长为 L 波段 23 m 其形变监测灵敏度为 1/2 波长即为 12.5 m (沿卫星视线向的), 再考虑到各种可能误差 (后面分析), 其区域内观测时段 92 d 内的变动位移很小. 可看到其红色抬升区域的抬升位移值绝大多数都在小于 20 m 的范围内, 因此抬升区域的抬升位移值大部分都处在误差影响范围内. 因此对研究区域垂直沉降滑动位移速率大于 6.67 m³月⁻¹ (0.0667 m³月⁻¹) 位移值大于 20 m 水平滑动位移速率 25.8 m³月⁻¹ (0.258 m³月⁻¹) 位移值大于 77.4 m 的区域划分为可能发生滑坡和滑坡活动的风险区域, 即为图中用紫色线圈圈出的两个区域. 经与研究区域地质资料及光学影像确认, 此两区域一个区域位于金沙江右岸一个较大泥石流沟的沟口附近, 另一区域位于该泥石流沟中汇水区的中部. 其形变位移值较大的原因除可能因为崩滑原因外, 也可能是由于沟中物质迁移所引起的.

3 与 GPS 对比研究

3.1 与 GPS 结果的对比

为证明 D-InSAR 技术在滑坡辨识监测上的可行性及正确性, 本文以研究区域内正处活动状态并

同时进行 GPS 监测的 L1R-6 号滑坡为例, 将其 D-InSAR 监测结果进行详细分析. 图 8 为 L1R-6 号滑坡上 D-InSAR 监测的详细滑动形变图. 在垂直滑动形变位移图中按滑动速率小于 0.0167 m³月⁻¹ (位移值小于 0.05 m)、滑动速率为 0.0167~0.0334 m³月⁻¹ (位移值为 0.05~0.1 m) 和滑动速率大于 0.0334 m³月⁻¹ (位移值大于 0.1 m) 从慢到快分为三个区域, 在水平形变位移图中按绝对值滑动位移速率小于 0.0647 m³月⁻¹ (位移值小于 0.194 m)、滑动速率为 0.0647~0.129 m³月⁻¹ (位移值为 0.194~0.387 m) 和滑动速率大于 0.129 m³月⁻¹ (位移值大于 0.387 m) 也从慢到快分为三个区域, 分别用黄、蓝和红三种颜色来显示. 从形变图中能清晰地分辨出不同区域的滑动速率和位移情况. 图中将 L1R-6 号滑坡划分为四个区域^[12-13], 其中 I 区的部分区域处在垂直向滑动速率小于 0.0167 m³月⁻¹ (水平向小于 0.0647 m³月⁻¹) 的滑动区间上, II 区的部分区间和 III 区处在垂直向滑动速率大于 0.0334 m³月⁻¹ (水平向大于 0.129 m³月⁻¹) 的滑动区间上, 其余区域都处在垂直向滑动速率为 0.0164~0.0334 m³月⁻¹ (水平向 0.0647~0.129 m³月⁻¹) 的滑动区间上. 图中红色线体为长江三峡院现场监测划定的重点灾害区, 可知处在 D-InSAR 监测结果滑动位移值为 5~13.3 m 的区间上.

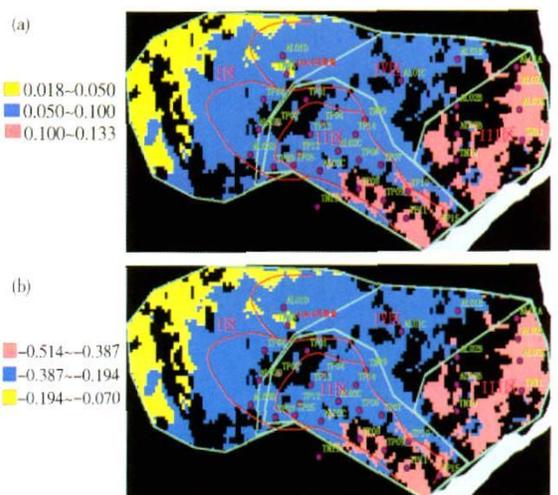


图 8 L1R-6 号滑坡的滑动形变图 (单位: m). (a) 92 d 的垂直滑动形变图; (b) 92 d 的水平滑动形变图

Fig. 8 Deformation map of L1R-6 landslide (unit: m). (a) 92 d vertical deformation map; (b) 92 d horizontal deformation map

将 D-InSAR 获得的 L1R-6 号滑坡的形变位移值与已获得的地面 GPS 监测结果相比较, 图 8 中绿色字体编号的紫色点为现场 GPS 监测点, 其中点名

为 AL01D AL02D AL03D TP44和 TP45等 5 个监测点位于 I 区, TP01 ~ TP15, AL02C和 AL03C等 17 个监测点位于 II 区, AL01A AL02A AL03A TN10, TN11, AL02B和 AL03B等 7 个监测点位于 III区, AL01B与 AL01C两个监测点位于 IV区. D-InSAR

的形变监测时间间隔是 2008 年 1 月 12 日—4 月 13 日, GPS I、II和 IV区的监测时间间隔是 2008 年 1 月 12 日—4 月 18 日, II 区的时间间隔是 2008 年 1 月 11 日—4 月 19 日. 图 9 为两种技术监测结果的比较.

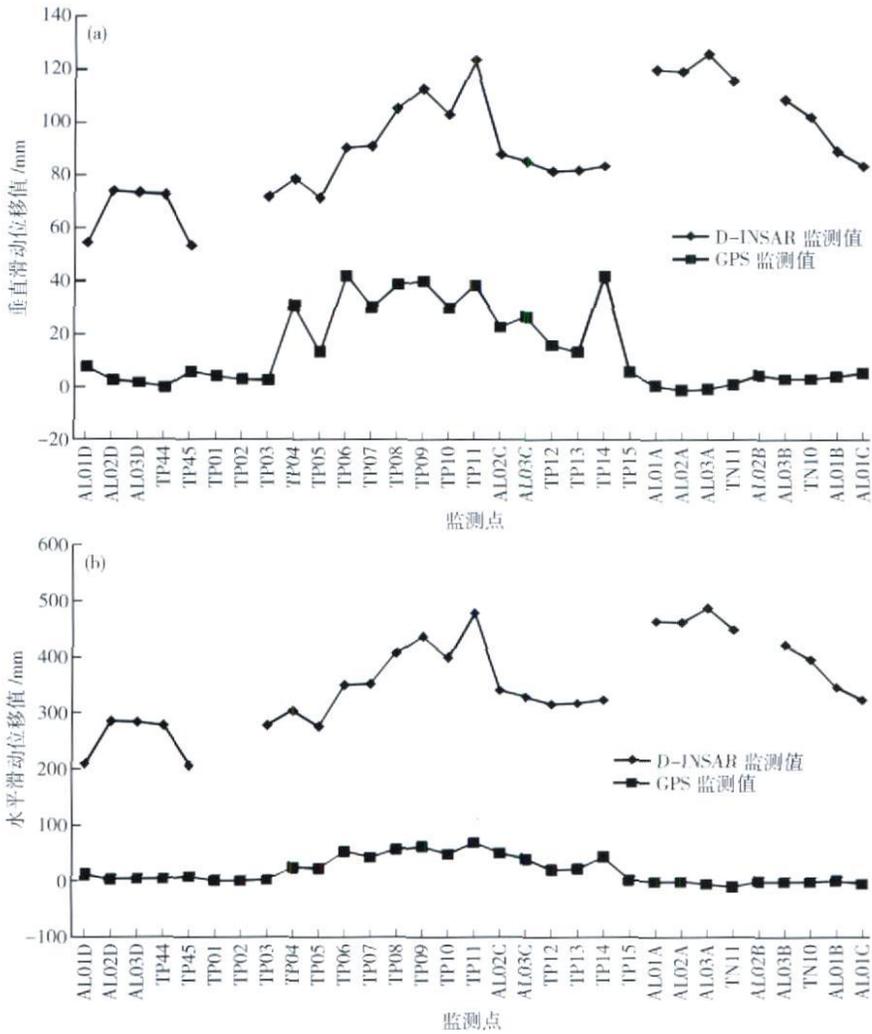


图 9 D-InSAR 与 GPS 监测结果的比较. (a) 92 d 的垂直滑动形变; (b) 92 d 的水平滑动形变

Figure 9 Comparison of D-InSAR and GPS monitoring results (a) 92 d vertical deformation (b) 92 d horizontal deformation

从图 9 可以看出, 尽管 D-InSAR 与 GPS 单点监测结果的量级不同, D-InSAR 技术由于所用数据微波波长的限制其量级仅为厘米且部分点由于处在相干性较差的区域上无法获取其形变信息, 地面 GPS 的监测结果为毫米精度, 但其整体形变和运动趋势是基本相一致的, 两者都表明 U1R-6 滑坡的 I 区变动最小, II 区由于所处位置和地质结构发生形变相对较大, 而 IV 区形变情况处于 I、II 区之间. 对于 III 区比较结果有所不同, D-InSAR 结果表明该区域发生的形变较大, 而 GPS 结果显示该区域发生形变较小且很多点处于抬升状态. 因此在小于 20 cm 的范围内原因不排除由于误差的影响, 有待于进一步

探讨.

3.2 误差分析

通过分析研究可以看出 D-InSAR 技术获得的形变值, 从整体上能够辨识出各个区域的滑动大小和趋势, 识别出可能的滑坡和危险区域. 只是单点数据的精确性还不够理想, 由于用 ALOS 数据的波长的限制监测结果处于厘米的量级, 且受数据对相干性的影响较大, 在形变数据对相干系数较小的区域无法获取其形变信息, 而在相干性较好的条件下各点都有微小形变值等. 这些误差既来源于航天 SAR 传感器本身也来源于 D-InSAR 技术. 综合分析本次研究所采用的技术和数据源, 其形变值误差主

要来源以下几个方面。

(1) SAR 传感器自身的限制产生的误差。受 SAR 传感器所发射电磁波波长的限制, 目前 D-InSAR 技术本身进行监测所得处理结果的形变位移值受所用波长的限制; 另外, 受卫星重复周期的限制, 对同一地区进行相同的观测至少需要十几天甚至几十天的时间间隔, 这使得发生较快地面活动的区域发生严重失相关, 因此 D-InSAR 技术目前只适合监测每月毫米至厘米到每年毫米至厘米级的滑坡活动状况。

(2) 失相关产生的误差。失相关是限制 D-InSAR 技术应用的一个较为严重的问题, 除了由于干涉数据的时间去相关外, 由于基线长度、轨道轻微不平行、变形运动过快、植被覆盖以及在连续获取数据期间发生的滑坡形变过多等都会导致相位的失相关问题, 严重影响数据处理结果的精度, 且对于数据对上相关性较小的区域无法获得其形变信息。

(3) 电磁波在大气中传播延时产生的误差。这个延时相当于在干涉图中附加一个相位, 这个附加相位给最终的测量结果增加了不确定性, 也就是说只要相干性满足一定条件即使实际没有形变的点, 也有微小位移值结果。因延时引起的位移残差一般在所用波长量级的范围内变动。

(4) 数据处理过程中处理方法的异同也会对结果产生误差。像去除平地效应的整平、滤除系统噪声的滤波以及相位解缠等处理的好坏都会直接影响测量结果误差的大小。

因此, 要消去 D-InSAR 技术监测的单点误差, 提高监测精度, 可将其与其他技术结合处理。本研究根据所拥有数据提出了 D-InSAR 与 GPS 相融合的栅格函数误差插值消减法, 对 I4R-6 号滑坡有 GPS 监测点的区域 D-InSAR 监测结果的误差进行了消减。

4 D-InSAR 与 GPS 相融合的栅格函数误差插值消减法

由于 D-InSAR 技术为面状监测、单点位移精度还不理想, 而 GPS 技术为单点监测、位移精度高达毫米量级; 因此利用两种技术各自的优点进行融合处理, 则可消去 D-InSAR 技术监测的单点误差值, 获得连续面状监测毫米精度的滑动位移值。因此, 本研究提出 D-InSAR & GPS 相融合的栅格函数误差插值消减法, 其基本思想是以反距离权重 (inverse distance weighted DW) 插值为基础。首先, 将 GPS 监测的单点位移值作为标准位移值, 计算 D-InSAR

与 GPS 在每一点监测结果的位移差, 其计算式可表示如下式:

$$Z(x_i, y_i, z_i) = S_D(x_i, y_i, z_i) - S_G(x_i, y_i, z_i) \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, N$

式中, N 为研究区上 GPS 监测点的数量, $S_D(x_i, y_i, z_i)$ 为研究区上第 i 个 GPS 监测点上的 D-InSAR 技术监测位移值, $S_G(x_i, y_i, z_i)$ 为研究区上第 i 个 GPS 监测点上的 GPS 监测位移值, $Z(x_i, y_i, z_i)$ 为研究区上第 i 个 GPS 监测点上的 D-InSAR 与 GPS 监测技术的位移差。利用式 (7) 得到有 GPS 监测点的位置处两种监测结果单点的误差函数值。

以这些单点误差函数值为标准, 进行有 GPS 监测点的监测区域内栅格数据反距离加权插值 (DW), 其插值原理公式如下:

$$Z(x_0, y_0, z_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j Z(x_j, y_j, z_j) \quad (8)$$

式中, $Z(x_0, y_0, z_0)$ 为点 (x_0, y_0, z_0) 处的预测误差值, n 为预算计算过程中要使用的预测点周围样点的数量, λ_j 为预测计算过程中使用的各样点的权重, $Z(x_j, y_j, z_j)$ 为在点 (x_j, y_j, z_j) 处获得的误差值。

权重 λ_j 的确定和计算公式为

$$\lambda_j = \frac{d_0^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_0^{-p}}, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (9)$$

式中: p 为指数值, 本研究取为 2; d_0 为预测点 (x_0, y_0, z_0) 与各已知样点 (x_j, y_j, z_j) 之间的距离。插值后得到 D-InSAR 研究区域上有 GPS 监测点的监测区域上各点的误差函数值, 假设其与位置坐标函数关系如式 (10) 所示:

$$Z(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (10)$$

式中, $Z(x, y, z)$ 为对应坐标点 (x, y, z) 处的误差函数值。

在获得插值后的误差函数值后, 对 D-InSAR 技术监测结果与误差函数值 $Z(x, y, z)$ 作差, 如下式所示:

$$S(x, y, z) = S_D(x, y, z) - Z(x, y, z) \quad (11)$$

式中, $S(x, y, z)$ 为误差消减后点 (x, y, z) 处的形变值, $S_D(x, y, z)$ 为 D-InSAR 技术获得的 (x, y, z) 处的形变值。

栅格函数误差插值消减后, 实现了 D-InSAR 技术监测结果在有 GPS 监测点区域上的误差的消除。

本研究将 D-InSAR 与 GPS 相融合的栅格函数误差插值消减法应用在 I4R-6 号滑坡上, 消减掉该区域上设有 GPS 监测点的区域 D-InSAR 监测结果的误差值, 其结果如图 10 所示。可以看到误差消减后, 其垂直滑动位移值大部分都处在小于 3 cm 的区

间上, 水平滑动位移值大部分都处在小于 8 m 的滑动区间上.

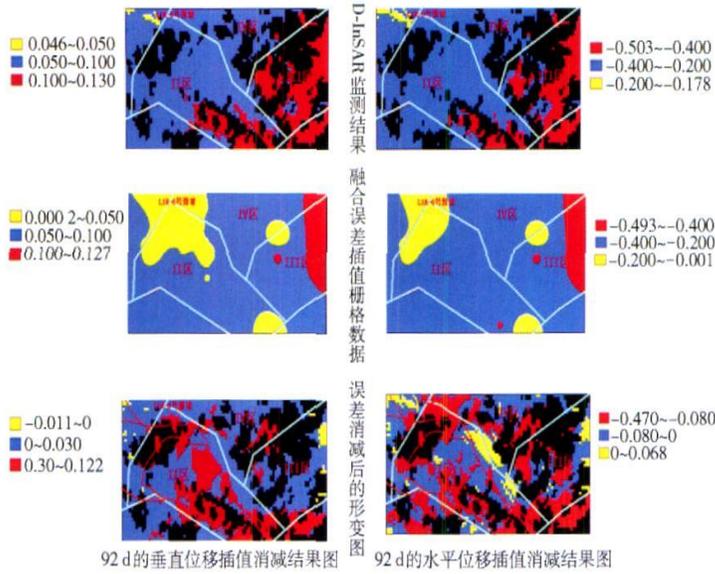


图 10 D-InSAR & GPS 融合消减掉误差后的形变图 (单位: m)

Fig 10 Deformation map of D-InSAR & GPS error reduction (unit: m)

为了能够清晰地表明消减掉误差后的滑动形变位移值状态, 图 11 给出了研究区域上研究期间 GPS 监测点处的 D-InSAR 监测、GPS 监测和栅格函数误差插值消减法消减掉误差后的三种情况下的滑动形变位移值状态. 图中清晰地表明了采用栅格函数误差插值消减法消减掉误差后有 GPS 监测点处的滑动形变位移值与 GPS 监测结果基本相同, 达到了 GPS 监测量级的精度. 因此, 区域上其他各点的位移值也都处在相同量级上, 即消除误差后获得了 D-InSAR 技术在有 GPS 监测点的监测区域上高精度的滑动位移值.

这种方法的优点是以 GPS 监测值为标准, 一次性消减掉 D-InSAR 技术由于各种原因产生的误差, 较适合大面积区域辨识的情况下对重点区域的监测.

5 结论

(1) 利用 D-InSAR 技术获得了研究区域内详细的垂直和水平滑动形变位移值, 通过利用滑动位移速率及形变大小对位移值的分级显示, 表明了研究区域上各部分区域的变动状态, 辨识出研究区域上可能发生滑动的区域和发生滑动较大的区域, 并通过与研究区域其他地质资料及光学影像对比, 分析了滑动位移较大区域的可能原因.

(2) 对单体 I4R-6 号滑坡进行了详细研究, 得到滑坡上各个区域的滑动位移状态. 与现场 GPS 监测进行了比较研究, 两者监测结果的位移趋势一致,

但 D-InSAR 差分位移单点监测精度低于 GPS 监测精度. 给出了 D-InSAR 技术单点监测误差的可能原因.

(3) 提出了基于反距离权重差值的 D-InSAR & GPS 相融合的栅格函数误差插值消减法, 消除了有 GPS 监测点的监测区域上 D-InSAR 技术监测结果的误差值, 提高了 D-InSAR 技术的监测精度.

本实验研究表明, 基于 D-InSAR 技术并使用 PAISAR 数据可以辨识出研究区域内滑坡滑动的可能区域, 确定滑动风险区域. 由于对滑坡的单点位移监测精度上还有一定的困难, 对精度要求较高的区域可结合 GPS 等对地观测技术加以解决.

参 考 文 献

- [1] Achache J, Fruneau B, Delacourt C. Applicability of SAR interferometry for operational monitoring of landslides // Proceedings of the Second ERS Applications Workshop, London, 1995: 165.
- [2] Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and modelling of the Saint-Jean-de-Tienne landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 1996, 265(3): 181.
- [3] Viemeier J, Wagner W, Dikau R. Monitoring moderate slope movements (landslides) in the southern French Alps using differential SAR interferometry // Proceedings of the 2nd International Workshop on ERS SAR Interferometry, FRNGE 99, Liege, Belgium, 1999.
- [4] Rizzo V, Tesauri M. SAR interferometry and field data of Randazzo landslide (Eastern Sicily, Italy). *Phys Chem Earth Part B*, 2000, 25(9): 771.
- [5] Paolo B, Marco C, Giorgio F, et al. Use of differential SAR inter

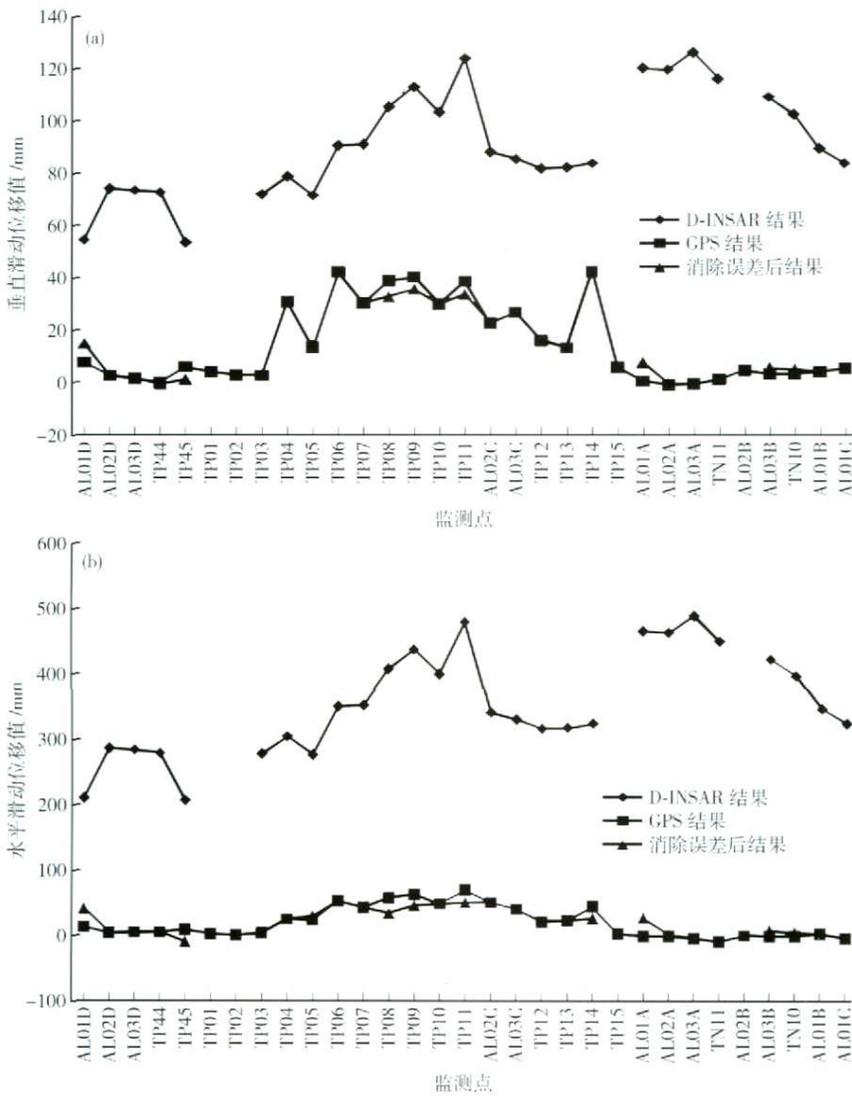


图 11 D-InSAR、GPS与消除掉误差后三种情况位移值比较。(a) 92 点的垂直滑动位移; (b) 92 点的水平滑动位移
 Fig 11 Deformation comparison of D-InSAR、GPS and error reduction (a) 92 d vertical deformation (b) 92 d horizontal deformation

ferometry in monitoring and modeling large slope instability at Maratea (Basilicata Italy). *Eng Geol* 2003 68 (1/2): 31

[6] Squarzoni C, Delacourt C, Allm and P. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Eng Geol* 2003 68(1/2): 53

[7] Colesanti C, Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng Geol* 2006 88: 173

[8] Singhroy V, Couire R, Molch K, et al. InSAR monitoring of post landslide activity// *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Denver 2006 1635

[9] Singhroy V, Alasset P, J Couire R, et al. InSAR monitoring of landslides on permafrost terrain// *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Canada 2008 2451

[10] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry// *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Hamburg 1999 1528

[11] Wang G, J, Xie M, W, Qiu C, et al. Application of D-InSAR technique on landslide monitoring. *Rock Soil Mech* 2010 31 (4): 1337
 (王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 等. D-InSAR技术在大范围滑坡监测中的应用. *岩土力学*, 2010 31(4): 1337)

[12] Li H, Z, Wang T, Y, Duan W, F, et al. Geological study on mechanism of Jinpingzi landslide and evolution of landform of Jinsha River. *J Yangtze River Sci Res* 2006 23(4): 17
 (李会中, 王团乐, 段伟峰, 等. 金坪子滑坡形成机制分析与河段河谷地貌演化地质研究. *长江科学院院报*, 2006 23(4): 17)

[13] Xie M, W, Esaki T, Qiu C, et al. A spatial three dimensional landslide susceptibility mapping tool and its applications. *Earth Sci Front* 2007 14(16): 73
 (谢谟文, 江崎哲郎, 邱骋, 等. 空间三维滑坡敏感性分区工具及其应用. *地学前缘*, 2007 14(6): 73)