引文格式：杨凯钧,雷帆,曹里,等. 联合GNSS和InSAR地灾区纯净形变场解算研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 113-117. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.06.027

联合GNSS和InSAR地灾区纯净形变场解算研究

杨凯钧[1,2,3]，雷　帆[2,3]，曹　里[1,2,3]，唐　伟[4]，张　哲[2,3]
（1. 中国地质大学（武汉），湖北 武汉 430078；2. 湖南省第二测绘院，湖南 长沙 410029；
3. 自然资源部南方丘陵区自然资源监测监管重点实验室，湖南 长沙 410029；
4. 中国矿业大学（北京） 地球科学与测绘工程学院，北京 100083）

摘　要：以湖南省麻阳县地质灾害易发区为实验区，通过多个GNSS基岩站长时间序列解算结果显示，区域整体地壳板块垂向形变量在3.39~4.85 mm，显示整体抬升趋势；通过InSAR长时间序列解算结果显示，整体地表绝对垂向形变量在-41~31 mm，显示整体沉降，局部抬升趋势。本文通过实验证明了在地质灾害研究区基岩GNSS站和InSAR两种技术手段监测结果存在较大的差异，判定其差异原因为基岩板块运动和裸露地表绝对运动之间的差异，随后分别对GNSS基岩观测和InSAR地表观测结果进行全域空间差值拟合后求差，得到区域纯净形变场为-34.46~34.89 mm，本文形成的区域纯净形变场解算方法，能够真实反映地灾区地表滑动，避免造成对滑坡隐患趋势的误判。

关键词：GNSS；时间序列；InSAR；形变场
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）06-0113-05

Research on Pure Deformation Field Calculation Method Based on GNSS and InSAR

YANG Kaijun[1,2,3], LEI Fan[2,3], CAO Li[1,2,3], TANG Wei[4], ZHANG Zhe[2,3]
(1. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China;
2. The Second Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410029, China;
3. Key Laboratory of Natural Resources Monitoring and Supervision in Southern Hilly Region, Ministry of Natural Resources, Changsha 410029, China;
4. China University of Mining and Technology (Beijing), School of Geosciences and Surveying and Mapping Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the geological disaster prone area of Mayang County of Hunan Province as the test area, the results of GNSS station time series calculation show that the vertical shape variable of the regional overall crustal plate ranges from 3.39 mm to 4.85 mm, indicating the overall upward trend. The results of InSAR long time series calculation show that the absolute vertical shape variable of whole surface ranges from -41 mm to 31 mm, indicating the overall subsidence and local uplift trend. In this paper, we proved that the monitoring results of two technical means were quite different through experiments. The key factor is the difference between the bedrock plate movement and the absolute movement of exposed surface. Then, we calculated the difference to obtain the relative shape variable of exposed surface movement compared with the bedrock. The regional pure settlement field was -34.46~34.89 mm. The method proposed in this paper can truly reflect the surface sliding in the disaster area, and avoid the misjudgment of landslide hidden danger trend.

Key words: GNSS, time series, InSAR, deformation

地质灾害的时序InSAR技术具有快速、监测范围大、时间跨度长、重复观测周期短、资金和人力成本低等优势，但是其时间分辨率较低，不能获得实时的地表形变信息。GNSS全球卫星定位系统也广泛应用于地质灾害形变监测，其优点是周期短、垂向定位精度能达到毫米至亚毫米级、通过布设的站网，能够在几分钟甚至几十秒时间内即可形成高精度定位结果，但是其站点稀疏，且布设成本较高，难以大面积高密度进行布设。为了对地质灾害易发区进行的大范围、高精度、长时序监控，当前国内外不少研究学者认可2种手段监测结果的一致性，往往采用2种手段联合的方式进行解译，进行了大量的实验研究[1-4]。

当前国内外学通常并未考虑2种技术手段观测的环境差异造成的垂向场之间的系统性差异，仅依靠InSAR手段直接解算得到研究区的沉降场，忽略了区域内整体板块运动的趋势，本研究创新性综合考虑了两

收稿日期：2022-12-30。
项目来源：湖南省自然资源厅科技计划项目（2023-55）；2024年度湖南省自然科学基金资助项目（2024JJ8342）。
第一作者简介：杨凯钧（1991—），博士研究生，高级工程师，研究方向为卫星遥感数据处理及信息化应用，E-mail：apple_hacker@163.com。

者之间的关联性，分别对GNSS基岩观测和InSAR地表观测进行垂向时间序列求解，在研究区进行全域空间差值拟合后进行求差，得到裸露地表相较于基岩运动的相对形变量，形成区域纯净沉降场[5-8]。

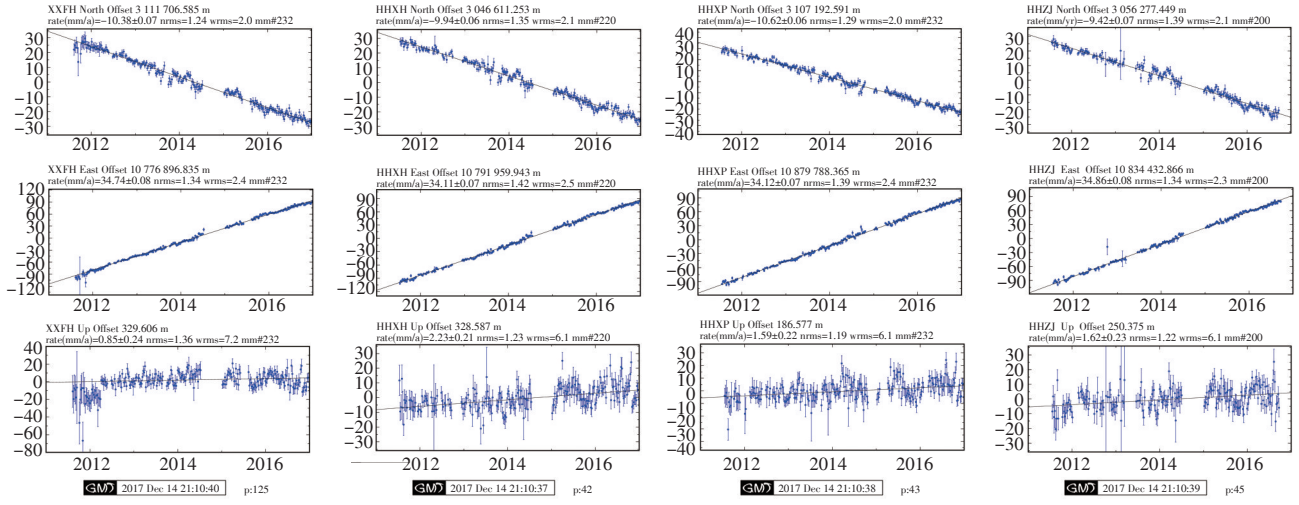
1 研究区概况

麻阳县位于雪峰山脉与武陵山脉之间，沅麻盆地中南部。地形总体呈西、南、北三面较高，中部较低，朝东倾斜开口，呈箕簸状。依据《湖南省麻阳县1∶5万地质灾害详细调查报告》作为本研究的地质参考资料数据。报告显示，麻阳县内共划分出了14个地质灾害易发区，其中高易发区5个，面积316.83 km^2，占全县面积的20.23%（不含水域面积），区内有地质灾害点105处，占全县灾害点总数的49.29%；中易发区5个，面积1 054.95 km^2，占全县面积的67.36%，区内有地质灾害点101处，占全县灾害点总数的47.42%；低易发区4个，面积194.43 km^2，占全县面积的12.41%，区内有地质灾害点7处，占全县灾害点总数的3.29%。

2 研究区GNSS垂向形变场

湖南省HNCORS系统作为湖南省统一的现代测绘基准基础设施，于2008年启动建设，历经十余年的发展，目前共有基准站130座（在建3座），基准站站间距平均为45 km。本研究经过筛选，扣除掉数据完整率较低的站点后，选择空间分布较好、布设在基岩的70座稳定基岩站点进行分析，通过湖南CORS的解算的各站点的长时间序列，采用三次样条（cubic spline）插值法，进行湖南省整体插值拟合，得到湖南省面状的地壳沉降速率场[9-10]。

研究区附近的几个GNSS站有湘西凤凰站（XXFH）、怀化新晃站（HHXH）、怀化溆浦站（HHXP）、怀化芷江站（HHZJ），这4个站点均为距离麻阳县域距离50 km以内的站点，能够较好反映麻阳地区整体地壳板块运动趋势，其时间序列如图1。



a 湘西凤凰站（XXFH）时间序列　b 怀化新晃站（HHXH）时间序列　c 怀化溆浦站（HHXP）时间序列　d 怀化芷江站（HHZJ）时间序列

图1 时间序列

上述时间序列显示，所有站点E向和N向均存在线性趋势，E方向速率约为30-~40 mm/a，N方向速率约为10 mm/a，垂向U方向整体呈线性上升趋势，但存在明显的周期项，主要表现为季节性、半年度和年度周期，线性趋势整体为1~2 mm/a。

进一步拟合得到本研究片区的怀化麻阳县片区的GNSS垂向形变场，其中麻阳县整体地壳板块抬升速率在1.27~1.82 mm/a，进一步推算在2019-01—2021-08 InSAR观测解算时段内抬升值在3.39~4.85 mm，其中麻阳西北片区整体抬升速率较低，东部和西南部抬升速率较高。

3 研究区InSAR垂向形变场

本文选取2019年1月—2021年8月高分辨率TerraSAR-X数据共26期进行处理。该数据为条带模式获取，分辨率为3 m，时间间隔11 d。采用小基线集干涉测量（SBAS, Small Baseline Subset）时间序列分析方法进行解算，得到形变速率及形变时间序列。

SBAS时序方法将所有SAR数据根据空间基线与时间基线阈值进行组合成小基线集，使得各子集内SAR数据时空基线较短，在每个子集中利用最小二乘方法进行计算，对各子集间利用奇异值分解法（Sin-

gular Value Decomposition，SVD）进行处理，最终获取整个时间序列上的形变信息。SBAS-InSAR利用具有较短时间、空间基线的干涉对生成差分干涉图，以提高干涉对的相干性。方法继承了传统方法的优点，且能获取长时间缓慢地表形变的演变规律，提高形变监测的时间分辨率[11-12]。该方法进行地表形变信息提取的主要流程如下所示：

1）假设有按时间序列获取的 $N+1$ 幅覆盖相同区域的SAR影像，（t_0，…，t_N）代表影像的获取时间，本文选取时间基线阈值为100 d，空间基线阈值为200 m，最终得到89幅差分干涉图。其影像获取时间序列为

$$t=[t_0,\ldots,t_N]^T \tag{1}$$

2）选取其中一幅影像为主影像进行配准后，在全部自由组合差分干涉对中选取符合时间基线和空间基线阈值的干涉对，并假设所有SAR影像已配准到同一坐标系下，从而可以得到 M 对时空基线均小于某一阈值的多视 差分干涉对，且 M 满足以下条件。

$$\frac{N+1}{2}\leqslant M\leqslant N\left(\frac{N+1}{2}\right) \tag{2}$$

假设 t_A 和 t_B 时刻的2幅SAR影像进行差分干涉生成第 j 幅差分干涉图，并假设 $t_B>t_A$。假设不考虑失相关、高程误差以及大气延迟等因素，去除地形相位后，则第 i 幅 $(i=1,\cdots,M)$ 差分干涉图中像元位置 (r,x) 的相位值为：

$$\delta\phi(x)=\phi(t_B,x)-\phi(t_A,x)=\frac{4\pi}{\lambda}\left[d(t_B,x)-d(t_A,x)\right] \tag{3}$$

式中，λ为雷达波长；$d(t_B,x)$ 和 $d(t_A,x)$ 分别为像元在时间 t_A 和 t_B 沿雷达视线方向（LOS）的形变，且 $d(t_0,x)=0$。由于SBAS技术是基于像元逐个计算来获取差分干涉图中各个像元在时间序列上的形变，下面以某个像元为例来介绍SBAS技术的解算模型。假设 ϕ 是由各时间点上SAR影像中高相干点对应的相位（相对于参考点）组成的向量，即待求参数：

$$\varphi=[\varphi(t_1),\cdots,\varphi(t_N)]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

解缠差分干涉图中相位组成的向量为观测量 $\delta\varphi$ 为：

$$\delta\varphi=[\delta\varphi_1,\cdots,\delta\varphi_M]^T \tag{5}$$

式中，$\delta\varphi_i(i=1,\cdots,M)$ 为相对于解缠参考点的相位值。

主影像（IE）和从影像（IS）对应的时间序列分别为：

$$IE=\left[IE_1,\cdots,IE_M\right]\quad IS=\left[IS_1,\cdots,IS_M\right] \tag{6}$$

假设主从影像是按照时间顺序排列的，即 $IE_j>IS_j$，其中 $j=1,\ldots,M$，则第 j 幅干涉图对应的相位可表示为：

$$\delta\phi_j=\phi\left(t_{IE_j}\right)-\phi\left(t_{IS_j}\right),\ j=1,\cdots,M \tag{20}$$

对于所有干涉图，将公式(20)的线性模型表示为矩阵形式：

$$\delta\phi=\boldsymbol{A}\phi \tag{21}$$

式中，矩阵 $\boldsymbol{A}[M\times N]$ 每一行对应每一个干涉对，每一列对应于一景SAR影像，因此，当干涉图主从影像编号 IE_j，IS_j 不为0时，每一行只有2个元素不为0：主图像对应的位置为+1，辅图像对应的位置为-1；当主从影像编号 IE_j，IS_j 为0时，因 ϕ_0 为参考时间 t_0 时刻的相位（相位为0），所以在参数估计时不再将 ϕ_0 作为未知量来计算，即系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 不考虑参考时刻 t_0 对应的相位的影响。例如：假设 $\delta\phi_1=\phi_4-\phi_2$ 和 $\delta\phi_2=\phi_3-\phi_0$，则对应的系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0&-1&0&+1&\cdots\\0&0&+1&0&\cdots\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\end{bmatrix}$$

若所有干涉对属于同一个子基线集，则矩阵 $\boldsymbol{N}$ 的秩为 $\boldsymbol{N}(M\geqslant\boldsymbol{N})$，其最小二乘解为：

$$\hat{\varphi}=\boldsymbol{A}^{\#}\delta\varphi\ \text{且}\ \boldsymbol{A}^{\#}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$$

当基线集中含有多个子集时，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 秩亏，$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{A}$ 为奇异矩阵。能解出上式唯一解的一种较为常用的方法是奇异值分解（singular value decomposition, SVD）法。非方阵的奇异值分解是正交的对角矩阵。对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行奇异值分解有：

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{S}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}$$

式中，$\boldsymbol{U}$ 为 $M\times N$ 阶正交矩阵；S 的对角元素为奇异值（singular value）$\sigma_i(1,\cdots,N)$；$\boldsymbol{W}$ 为 $N\times M$ 阶正交矩阵。上式的最小二乘范数解为：

$$\hat{\varphi}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\delta\varphi$$

式中，$\boldsymbol{S}^{-1}=\mathrm{diag}(1/\sigma_1,\cdots,1/\sigma_{N-L+1},0,0)$。为了得到符合物理意义的解，将对相位的求解转化为对相位变化速率的求解问题，则待求参数向量为：

$$V^T=[V_1=\frac{\varphi_1-\varphi_0}{t_1-t_0},\cdots,V_N=\frac{\varphi_N-\varphi_{N-1}}{t_N-t_{N-1}}]$$

可以简化为：

$$\boldsymbol{B}v=\delta\varphi$$

式中，$\boldsymbol{B}$ 为 $M\times\boldsymbol{N}$ 阶矩阵；矩阵元素 $\boldsymbol{B}[i,j]=(t_{j+1}-t_j)$ $(IS_j+1\leqslant j\leqslant IM_j,\ \forall i=1,\cdots,M)$，其他元素值为零。对 $\boldsymbol{B}$ 进行奇异值分解，解出各时间段内的相位变化速率 v，然后据此计算并恢复相位时间序列，进而可得到形变时间序列。

通过干涉得到的34 239个PS垂向变化值从LOS方

向投影到垂向，得到整个片区沉降场。结果显示，2019年1月—2021年8月，麻阳地区东西向呈沉降趋势，南北向呈抬升趋势，存在一东一西20个沉降漏斗以及一南一北2个抬升凸起，中间片区（含主城区）呈抬升沉降交叉状态，整体形变量在-41~31 mm，监测期内整体区域沉降平均值为-4.36 mm，整体标准差为3.02 mm。

4 研究区纯净垂向形变场

通过上述解算显示，利用GNSS监测手段显示，麻阳地区2019年1月—2021年8月，麻阳地区整体地壳板块垂向形变量VGNSS在3.3~4.85 mm；利用InSAR监测手段，麻阳地区整体地表绝对垂向形变量VInSAR在-41~31mm。为了精准求得该区域纯净的地表沉降场Vclean，计算公式为：

$$V_{clean} = V_{GNSS} + V_{InSAR}$$

值得注意的是，InSAR观测为相对形变量，在干涉图解缠时，并没有设置解缠起算点，而是在时序处理中，采用三维解缠的方法，在时间上以主影像为起始时间，所以InSAR观测为相对形变量，即所采用的SAR数据时间范围内的形变量（2020年7月5日—2021年4月6日）。因此，在扣除GPS形变时，首先也计算2020年7月5日—2021年4月6日的GPS相对形变量，再进行插值计算。

本文采用空间插值的方式进行全域空间求差，GNSS全域形变采用麻阳周边的若干GNSS垂向形变进行插值，InSAR全域形变采用PS干涉点的垂向投影结果进行插值。最终在在全域范围内，在相同坐标位置对两者进行求差，得到纯净形变量。

由于GNSS和InSAR的空间分辨率差异很大。文章所用的SAR数据分辨率为3 m，本文关注的是研究区的区域性地表形变，所以在InSAR处理过程中，经过多视处理、滤波、地理编码等操作后，输出的InSAR地表形变分辨率大致100 m。GPS解算的形变结果反映的是研究区整体地壳板块变形，这种变形特征尺度较大，在空间上较为平滑，虽然GPS站点分辨率低，但是经过形变结果的插值可以得到区域性、空间平滑的大尺度地壳形变。因此，本文InSAR和GNSS相减之前已经进行了空间分辨率的统一。

由于麻阳地区整体地壳板块垂向形变量VGNSS均为正值，纯净的地表沉降场Vclean体现为抬升区会有更大的提升，沉降区的值会进一步降低。计算后麻阳区域纯净垂向运动场为-34.46~34.89 mm，整体运动趋势基本和InSAR计算得到的地表绝对垂向形变场基本保持一致，东南片区抬升量较大，西北片区抬升量较小。

依据最终纯净形变场，在2019年1月—2021年8月观测时段内，按照整体速率绝对值>16 mm/a，共识别和圈出了12处沉降存在加速变形的区域，12处地面沉降的区域按照加速等级划分，其中3处进入了中加速阶段，监测期内速率极值区间为-46.8 ~-33.5 mm/a；9处进入了中加速阶段，监测期内速率极值区间为-46.8 ~-33.5 mm/a。结合高分辨率影像和现场实地勘察，发现上述区域均为建设动土区域或边坡地灾易发区，印证了本文监测结果。

5 结 论

本文通过利用GNSS基岩站长时序观测和InSAR卫星产时序观测2种手段，分别计算了地质灾害易发区的垂向运动场，并进一步分析了两者差异和原因，结果表明：

1）在麻阳县地质灾害易发区，地壳板块的运动整体为2.4 mm/a左右的缓慢抬升趋势，包含地壳板块和地表土壤砂砾层的绝对形变整体为-24~19 mm/a区间，两者存在明显反差，且存在数量级上的差异，2种手段的监测结果并非是可以相互印证的。

2）由于地质滑坡、泥石流等主要地质灾害多为表层土壤剥离基岩或底层土壤造成，与地质灾害强关联的参量应该是绝对形变扣除掉基岩形变后的相对形变，而非绝对形变，只有相对形变能够最真实反应灾前运动趋势。

3）本研究形成了一套基于GNSS、InSAR两种技术手段形成了地灾隐患区纯净形变场提取方法，给研究地质灾害区域的后续研究者提供了参考。

参考文献

[1] Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and Modelling of the Saint-tienne-de-tinée Land-slide Using SAR Interferometry[J].Tectonophysics, 1997, 265(3-4):181-190

[2] 张勤,黄观文,杨成生.地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J].测绘学报,2017,46(10):1 300-1 307

[3] 陈威,乔学军,刘刚,等.基于GNSS与InSAR约束的九寨沟M_S7.0地震滑动模型及其库仑应力研究[J].地球物理学报,2018,61(5):2 122-2 132

[4] 汪友军,胡俊,刘计洪,等.融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 598-1 608

[5] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966

[6] 范青松,汤翠莲,陈于,等.GPS与InSAR技术在滑坡监测中的应用研究[J].测绘科学,2006(5):60-62

[7] 张艳梅,王萍,罗想,等.利用Sentinel-1数据和SBAS-InSAR技术监测西安地表沉降[J].测绘通报,2017(4):93-97

[8] 雍琦,高二涛,余杭洺,等.利用InSAR和GPS形变数据反演断层深部滑动的敏感性分析[J].大地测量与地球动力学,2022,42(1):59-64

[9] 姜卫平，李昭，刘鸿飞，赵倩. 中国区域IGS基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J]. 地球物理学报，2013，56(07):2 228-2 237

[10] 杨凯钧，袁鹏，秦昌威.顾及偏态的IQR法则在GPS时间序列异常值探测中的应用[J].大地测量与地球动力学,2015,35(5):793-796

[11] 闫怡秋,郭长宝,张永双,等.基于SBAS-InSAR技术的西藏雄巴古滑坡变形特征[J].地质学报,2021,95(11):3 556-3 570

[12] 王志岗,周文韬.基于GPS-InSAR加权融合的矿区地表形变监测研究[J].地理空间信息,2022,20(11):81-84

（上接第112页）

期得到更可靠的结果。

参考文献

[1] 李智敏，盖海龙，李鑫，等.2022年青海门源M_S6.9级地震发震构造和地表破裂初步调查[J].地质学报，2022,96(01):330-335.DOI:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022124

[2] 张培震，邓起东，张国民,等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑:地球科学)，2003，33(增刊):12-20

[3] 薛善余，谢虹，袁道阳，等.2022门源M_S6.9地震地表破裂带震害特征调查[J].地震工程学报，2022，44(02):458-467.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220215001

[4] 韩帅，吴中海，高扬，等.2022年1月8日青海门源M_S 6.9地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示[J].地质力学学报，2022，28(02):155-168

[5] 朱建军，李志伟，胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 717-1 733

[6] 颜丙囤，季灵运，蒋锋云，等. InSAR数据约束的2022年1月8日青海门源M_S6. 9地震发震构造研究[J]. 地震工程学报,2022,44(2):450-457

[7] 张成龙，李振洪，张双成，等. 综合遥感解译2022年Mw6. 7级青海门源地震地表破裂带[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(7):1-15

[8] 余鹏飞，陈威，乔学军，等. 基于多源SAR数据的2022年门源Ms 6. 9地震同震破裂模型反演研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(6):898-906

[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(7):9 183-9 191

[10] Strozzi T，Luckman A，Murray T，et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-tracking Procedures[J].IEEE Transactions on，Geoscience and Remote Sensing，2002，40(11):2 384-2 391

[11] Wright T J . Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR[J]. Geophysical Research Letters,2004,31(1):L01607

[12] Gudmundsson S. Crustal Deformation Mapped by Combined GPS and InSAR[D]. Dissertation For The Degree of M. Sc,2000

[13] 史健存,杨泽发,吴立新. 优化先验模型参数的矿区多轨InSAR三维形变监测[J]. 测绘通报,2022(7):1-12

[14] Pepe A，Lanari R. On the Etension of the Minimum Cost Flow Algorithm for Phase Unwrapping of Multitemporal Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2006,44(9):2 374-2 383

[15] 朱琳,戴勇,石富强,等. 祁连:海原断裂带库仑应力演化及地震危险性[J]. 地震学报,2022,44(2):223-236

[16] 洪顺英. 基于多视线向D-InSAR技术的三维同震形变场解算方法研究及应用[J]. 国际地震动态,2012(10):45-48

[17] Hilley G E，Bürgmann R，Ferretti A，et al. Dynamics of Slow-moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis[J]. Science,2004,304(5 679):1 952-1 955

[18] 刘博瀚. 基于InSAR技术的2016年门源M_W5. 9级地震同震-震后形变与震源参数反演研究[D]. 西安:长安大学,2021

[19] Massonnet D，Rossi M，Carmona C，et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. Nature,1993,364(6 433):138-142

[20] 游新兆,王琪. 合成孔径雷达干涉测量原理与应用[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(3):109-116