引文格式：刘世伟,刘洪亮,邓选滔,等. 基于星载时序InSAR的长距离输水管线健康监测[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):27-31. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.06.006

基于星载时序InSAR的长距离输水管线健康监测

刘世伟[1]，刘洪亮[2*]，邓选滔[1]，苑鹏飞[1]，冯剑锋[1]，汤益先[3]
（1. 广东粤海珠三角供水有限公司，广东 广州 511458；2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010；
3. 中国科学院空天信息创新研究院，北京 100094）

摘 要：长距离输水管线是水资源调配工程的重要组成部分，对实现我国水资源合理配置具有重要作用。掌握输水管线沿线周边的地表形变状况，对保障输水工程的安全运营至关重要。利用时序合成孔径雷达干涉测量技术可以快速地获取输水管线沿线的大范围地表形变信息，为及时发现潜在的地面沉降等地质灾害潜在隐患提供可靠的线索。因此，利用基于自然年的时间子集时序InSAR方法对哨兵1号数据进行处理，获取了珠江三角洲水资源配置工程B2标段沿线2021年与2022年的地表形变，通过分析2 a期间B2标段沿线地表形变，发现在2021—2022年期间，B2标段沿线出现6处地表形变加剧的区域，将对输水管线的安全施工及运营产生潜在的地质风险。

关键词：时间子集InSAR；输水管线；地表形变
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0027-05

Long Distance Water Transmission Pipeline Health Monitoring Based on Satellite-borne Time-series InSAR

LIU Shiwei[1], LIU Hongliang[2], DENG Xuantao[1], YUAN Pengfei[1], FENG Jianfeng[1], TANG Yixian[3]
(1. Guangdong GDH Pearl River Delta Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 511458, China;
2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Long distance water transmission pipeline is an important part of water resources allocation project, which plays an important role in realizing the rational allocation of water resources in our country. It is very important for the safe operation of water conveyance project to monitor the surface deformation around the pipeline. Using satellite-borne time-series synthetic aperture radar interferometry technique (MT-InSAR) can obtain the surface deformation information along the pipeline over a large area efficiently, which is helpful to detect potential geological hazards. In this paper, we used the temporal subset time-series SBAS-InSAR method based on natural years to process Sentinel-1 data, and obtained the surface deformation along the B2 section of the Pearl River Delta water resources allocation project in 2021 and 2022. By analyzing the changes of surface deformation along the B2 section during the two-year period, we found that there were 6 areas with aggravated surface deformation along the B2 section from 2021 to 2022, which would bring potential geological risks to the safe construction and operation of water transmission pipeline.

Key words: temporal subset InSAR, water transmission pipeline, surface deformation

目前时序InSAR根据处理的对象主要分为两大类：①以点目标为处理对象的永久散射体技术（persistent scatterer interferometry，PSI），它通过从时序SAR图像中识别散射稳定的点目标作为分析对象，通过构建网络、形变模型建立实现对点目标形变的反演[1-2]；②以分布目标为分析对象的小基线干涉处理（small baseline dataset，SBAS），它通过限制干涉组合的时空基线，最大限度地降低分布目标的失相干影响；通过相位解缠，干涉组合方程构建实现形变反演[3-4]。在SBAS干涉组合的策略思想影响下，近几年干涉组合策略的优化成为提升时序干涉图质量的重要研究步骤，其中通过在时间尺度上进一步的子集划分实现了干涉相位图质量的提升与相干测量点数量的增加[5-7]。时序InSAR两类技术体系目前已经在城市地面沉降、滑坡、矿区形变等地表形变监测中得到了广泛应用[8-11]，而在水利工程上也开始被应用于大坝及输水工程的形变监测[12-14]。

本文拟针对珠江三角洲水资源配置工程B2标段施工沿线的地表形变危害，采用基于按自然年分组策略的相干目标时序InSAR方法对所获取的2021—2022年哨兵1号数据进行处理分析，通过对比2021年与2022年

项目来源：江三角洲水资源配置工程专项科研课题资助项目（CD88-QT01-2022-0085）。
第一作者简介：刘世伟（1993—），硕士，主要研究方向水工结构工程与工程管理，E-mail：liushiwei@gdhwater.com.
通信作者：刘洪亮（1979—），本科，高级工程师，主要研究方向水利工程安全监测，E-mail：liuhongliang@cjwsjy.com.cn。

的沿线周边地表形变变化，实现对该区域安全性的监测和风险评估分析。

1 基于自然年分割策略的时序InSAR方法

InSAR技术在大范围、长时间序列的地表形变监测方面有着巨大的应用潜力。然而自然地表在长时间的监测周期下，其散射特性往往无法在全周期内保持不变，从而导致长时序InSAR形变监测结果中相干测量点数量的降低。面向珠江三角洲水资源配置工程的施工状况，实现输水管线不同年份之间沿线形变的变化动态分析，同时为了保证长时序InSAR监测的相干点数量，本论文从时间子集的角度出发，设计了一种基于以自然年为分割标准的相干目标InSAR方法（coherence point target insaR，CPT-InSAR），图1展示了基于自然年分割策略的CPT-InSAR算法的处理流程。

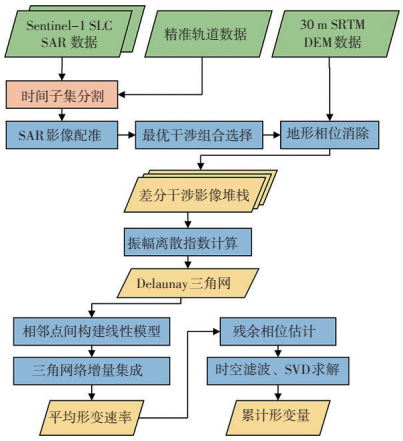


图1 基于自然年分割的CPT-InSAR技术路线

本文采用的以自然年为时间子集的分割策略，将所获得的全部时序SAR图像按照年际标准分割为若干个高相干时间子集，不仅可以有效降低因不同年份之间的地表覆盖变化、相干性下降而导致的相干点数量减少的可能，同时也更加方便获得逐年的地表形变速率结果，有利于开展地表形变空间尺度上的年际变化分析，为发现输水管沿线地质灾害风险提供便利。

为了保证形变监测的结果精度，对各个自然年子集的SAR图像进行全连接的干涉组合，计算各个干涉组合下的平均相干系数，并依据平均相干系数由高到低对所有干涉组合进行排序，选择其中一定数据量具有较高相干系数的干涉组合进行后续相干目标InSAR处理，以保证相干目标的数量和形变解算精度。

相干目标的选择采用自适应的平均相干系数阈值法，通过计算时序平均相干图，选择其中大于平均相干图均值加3倍方差的像素作为相干目标进行相干目标时序InSAR分析，即

$$\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\gamma_i \geqslant \gamma_T \tag{1}$$

式中，M 为所有干涉组合的数量；γ_i和γ_T 分别为某一像素的相干系数和设定的相干系数阈值。

利用所有选择的相干目标构建Delaunay三角网络，则三角网络上任意一条边上的差分干涉相位可以表示为：

$$\Delta\varphi_{\mathrm{diff}}(A,B,T_i)=\Delta\varphi_{\mathrm{diss}}+\Delta\varphi_{\mathrm{topo}}+\Delta\varphi_{\mathrm{atmo}}+\Delta\varphi_{\mathrm{noise}} \tag{2}$$

式中，$\Delta\varphi_{\mathrm{diff}}$ 为相邻相干目标的干涉相位差；$\Delta\varphi_{\mathrm{diss}}$，$\Delta\varphi_{\mathrm{topo}}$，$\Delta\varphi_{\mathrm{atmo}}$ 和 $\Delta\varphi_{\mathrm{noise}}$ 分别为相邻相干目标之间的形变相位差，残余地形相位差，大气相位差和噪声相位，考虑到大气相位的空间相似性，则 $\Delta\varphi_{\mathrm{atmo}}\approx 0$，同时构建差分干涉相位与线性速率和高程误差之间的线性模型，如公式（3）所示。

$$\Delta\varphi_{\mathrm{model}}(A,B,T_i)=\frac{4\pi}{\lambda}\times T_i\times\Delta v(A,B)+\frac{4\pi}{\lambda}\times\frac{B_{\perp}\times\Delta\varepsilon(A,B)}{R_i\times\sin\theta_i} \tag{3}$$

式中，$\Delta\varphi_{\mathrm{model}}$ 为像素 $A=(x_a,y_a)$ 和 $B=(x_b,y_b)$ 在同一差分干涉影像上的相位模型；T_i 为此干涉组合的主从影像之间的时间跨度；λ 为卫星波段的波长；Δv 为2个像素之间的速率之差；$B_{\perp}$ 为垂直的空间基线；$\Delta\varepsilon$ 为2个像素之间的高程误差增量；R_i 为斜距；θ_i 为雷达侧视角。通过定义如下整体时间相干系数，并利用周期图或波束谱估计（beamforming）的方法估计 $\Delta v,\Delta\varepsilon$，实现整体相干系数的最大化最优化的方法可以实现参数的求解作为目标函数。

$$\max_{\Delta v,\Delta\varepsilon}|\gamma|=\left|\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\exp\left[j\left(\Delta\varphi_{\mathrm{diff}}-\Delta\varphi_{\mathrm{model}}\right)\right]\right| \tag{4}$$

基于最大化前2个要素的思想来获取Delaunay网络中，每一条连线之间的线性形变速率差值和高程误差差值的估计量，并采用区域增长的积分方法实现全网络内高相干点的线性形变速率和高程误差绝对值的计算。在差分干涉相位中消除线性形变参量和高程误差参量后得到未能完全拟合而产生的残余相位分量。通过空间维度上的低通滤波器实现随机噪声的消除，利用时间维度上的低通、高通滤波分别实现形变速率非线性部分和大气延迟参量的估计。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

珠江三角洲水资源配置工程由输水干线（鲤鱼洲取水口至高新沙水库、高新沙水库至沙溪高位水池、沙溪高位水池至罗田水库等3段组成）、深圳分干线

（罗田水库至公明水库）、东莞分干线（罗田水库至松木山水库）和南沙支线（高新沙水库至黄阁水厂）组成，输水线路总长度113.2 km，本文以珠江三角洲水资源配置工程B2标段为研究对象，包括输水干线和南沙支线两段，其中输水干线为高新沙水库段至沙溪高位水池的一部分。图2中绘制了珠江三角洲水资源配置工程B2标段的管线走向以及重点区域名称。

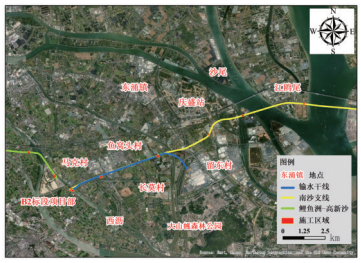


图2　珠江三角洲水资源配置工程B2标段示意图（底图来自Esri World Imagery）

2.2　数据情况

2.2.1　SAR数据

本论文利用欧洲太空局（European Space Agency，ESA）提供的C波段（波长为55.466 mm）Sentinel-1 SAR卫星数据作为时序InSAR处理的数据源。SAR数据集的轨道号为11-71，通过在宽幅干涉工作模式（interferometric wide swath，IW）下采用渐进扫描成像模式（terrain observation with progressive scans，TOPS）获取，时间跨度为2021年1月—2022年12月，共计61景降轨单视复数数据（Single Look Complex，SLC）影像，其分辨率为5 m×20 m，入射角为29~46°，幅宽为250 km。数据详细信息见表1。

2.2.2　辅助数据

ESA提供的精准轨道数据用于SAR影像的亚像素级别配准。30 m SRTM（shuttle radar topography mission）DEM数据用于InSAR地形相位消除处理以及地理编码。

3　结果与讨论

3.1　数据处理

对获取的2021年到2022年共计61景Sentinel-1 SAR影像，采用基于自然年分割的处理策略进行分割，并进行时间序列上的影像配准工作，采用全连接的方式生成干涉组合。为减小噪声误差的影响，在方位向和距离向分别采用4和16的多视处理。通过计算干涉影像的平均相干性并进行排序，分别选择相干性最佳的前100组干涉组合作为后续的干涉影像堆栈。采用基于振幅离散指数的方式从筛选的干涉影像中选择高相干像素，以相干系数均值0.7和方差0.1为阈值

表1　本实验Sentinel-1 SAR影像相关数据信息

数据类型	Slc	升降轨	降轨
极化方式	VV	入射角	29~46°
分辨率	5 m×20 m（方位向×距离向）	幅宽	250 km
成像时间	20210102、20210114、20210126、20210207、20210219、20210303、20210315、20210327、20210408、20210420、20210502、20210514、20210526、20210607、20210619、20210701、20210713、20210725、20210806、20210818、20210830、20210911、20210923、20211005、20211017、20211029、20211110、20211122、20211204、20211216、20211228、20220109、20220121、20220202、20220214、20220226、20220310、20220403、20220415、20220427、20220509、20220521、20220602、20220614、20220626、20220708、20220720、20220801、20220813、20220825、20220906、20220918、20220930、20221012、20221024、20221105、20221117、20221129、20221211、20221223		

进行高相干目标选择，2021年、2022年的平均相干系数图和相干目标结果如图3和图4所示，分别获取了1 012 432个和1 016 251个高相干像素。

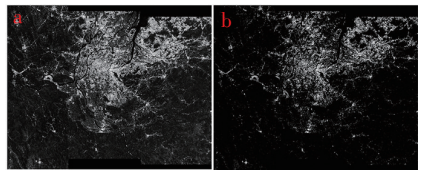


图3　2021年平均相干系数图和选择的相干目标

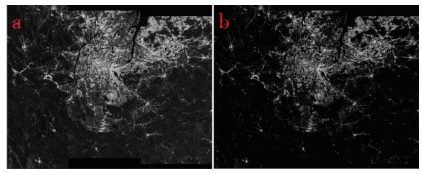


图4　2022年平均相干系数图和选择的相干目标

在获得相干目标之后，通过建立Delaunay三角网络与形变模型，进行区域的地表形变反演。需要注意的是InSAR处理所反演的地表形变量，均是相对于监测区域内某一点的相对形变值，因此需要在研究区域内，选择一个相对稳定的点（假设观测期间无形变）作为参考点，将所获得的地表形变值转化为以该点为标准的形变值。本研究中的参考点选取区域内地表稳定的广州市南沙区东新村人工建筑物，其地理坐标为22.852 2°N，113.449 2°E。

3.2　输水管线结果分析

3.2.1　形变监测结果与精度验证

基于自然年分割策略的InSAR处理方法获取的珠江三角洲水资源配置工程B2标段于2021年和2022年的地表平均形变速率结果如图5、6所示。其中负值表示相对于参考点为地表下沉的形变量，正值表示相对于参考点为地表抬升的形变量。



图5　2021年B2标段输水管线及周边区域形变年平均形变速率图



图6　2022年B2标段输水管线及周边区域形变年平均形变速率图

在2021年1月2日—2021年12月28日期间，B2标段输水管线及其周边区域的大部分表现出较为稳定的状态，但在庆胜站、鱼窝头村东部以及长莫村等区域表现出较大的沉降趋势，最大沉降点位出现在庆胜站周围（22.872°N，113.488°E），沉降速率为41 mm·a^{-1}。

2022年输水管线以及周边区域的地表形变结果与2021年的结果相对比，沉降趋势呈现增大的趋势。整体来看，在高沙村、鱼窝头村、骝岗、庆胜站、留东村以及长莫村均监测到每年5 mm以上的沉降。2022年研究区域的最大沉降点位出现在留东村周边（22.863°N，113.505°E）。

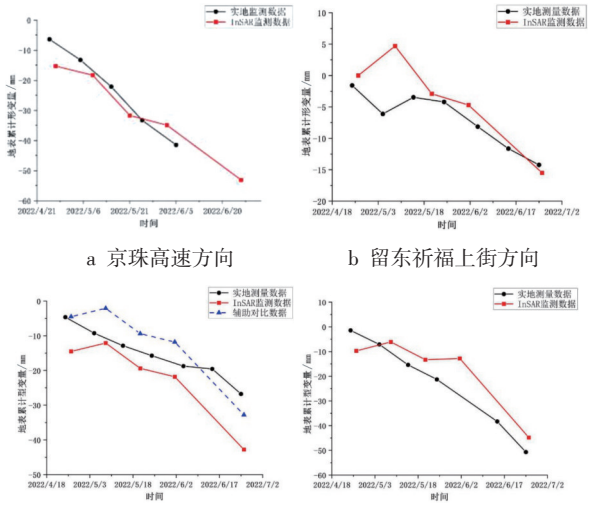
为了验证上述时序InSAR处理获取形变监测结果的准确性，于2022年在珠江三角洲水资源配置工程沿线四处施工断面区域开展了实地的水准测量工作，将其与2022年的InSAR监测结果相对比，结果如图7所示。2022年4—6月获得观测点实测数据与时序InSAR反演的形变结果在4个试验点均表现出了一致的地面沉降趋势，总体沉降趋势的变化吻合，总体的均方根误差为4.5 mm。

3.2.2　输水管线沿线严重形变区域分析与讨论

InSAR结果显示，珠江三角洲水资源配置工程B2标段输水干线及南沙支线在2021—2022年期间出现了六处地表形变加重区域（长莫村、鱼窝头村东部、庆胜站、高沙村、鱼窝头村、留东村），这些快速沉降区域可能对输水管线的安全施工及运营产生潜在的地质风险。

长莫村及其周围是研究区域内沉降范围以及速度较为严重的区域之一，2021年该区域已经被监测到有较严重的沉降趋势。点位（22.829°N，113.468°E）从2021年1月2日—2021年12月28日期间累积形变量的时序曲线图显示该点位已沉降35 mm，且沉降速率较快。2022年长莫村及其周边地区沉降现象仍较严重，且相较于2021年沉降范围呈现扩大趋势，沉降速度有一定下降但仍保持较高的速率。点位（22.830°N，113.468°E）从2022年1月9日—2022年12月23日期间的累积形变量的时序曲线图显示该点位在2022年已沉降26 mm。长莫村的相关结果可见图8。

2021年在鱼窝头村东部以及周围区域已经表现出



a 京珠高速方向　　b 留东祈福上街方向

c 庆留街方向　　d 庆东街方向

图7　InSAR形变与实测数据形变结果对比

沉降的趋势。点位（22.858°N，113.474°E）2021年1月2日—2021年12月28日期间的累积形变量时序曲线显示沉降量为13 mm，期间出现小幅减缓以及抬升，但整体还是下沉趋势。该点位2022年的沉降速率有所减小，但在其西向检测出更为严重的沉降点位（22.858°N，113.473°E），其在2022年1月9日—2022年12月23日期间的累积形变量时序曲线中显示沉降量为22 mm，且呈现快速、持续的下降趋势。

在2021年期间，庆胜站周围区域观测到了最大沉降点位（22.878°N、113.495°E），其2021年1月2日—2021年12月28日期间的累积形变量曲线图如图8d，该点位及周围区域在该年度内发生沉降41 mm，且呈现快速、持续的下降趋势。2022年，周围点位（22.876°N，113.496°E）累积形变量曲线显示沉降依旧严重，年际下沉22 mm。同时根据Google Earth光学图像，快速以及大面积的沉降区域出现在庆胜站东北方向的施工场地。

B2标段项目部以及周围区域2021年期间整体较为稳定，区域较大的沉降点位（22.832°N，113.410°E）在2021年1月2日—2021年12月28日期间的累积沉降量为6 mm。但在2022年该区域出现较为严重的沉降趋势，点位（22.838°N，113.422°E）在2022年1月9日—2022年12月23日期间累积沉降33 mm，周围区域也表现出快速、持续下沉的趋势，光学图像显示该区域较大的沉降大部分处于施工用地区域。

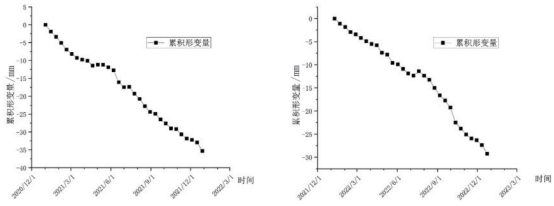
马克村2021年期间整体较为稳定，个别区域出现形变大于5 mm的沉降点位。沉降量较大的点位（22.844°N，113.436°E）在2021年1月2日—2021年12月28日期间累积下沉10 mm，速度相对较缓慢，期间出现部分抬升现象。但在2022年期间，鱼窝头村出



a 2021年平均形变速率图　b 2022年平均形变速率图



c 庆盛站Google光学图像（2022年1月）　d 庆盛站Google光学图像（2023年2月）



e 2021年累积形变量　f 2022年累积形变量

图8　庆盛站区域2021、2022年平均地表形变结果、光学影像以及累积形变量结果图

现大面积的沉降现象，主要沿输水干线，分布在干线两侧。沉降趋势严重的点位（22.846°N，113.440°E）在2022年1月9日—2022年12月23日显示区域沉降量为15 mm，且沉降速率有加快趋势。

留东村在2021年观测到的平均形变结果中，其东北方向的建筑有沉降迹象，但整体较为稳定。点位（22.863°N，113.508°E）从2021年1月2日—2021年12月28日累积沉降14 mm。但该建筑区域以及留东村东部临海区域在2022年观测到较严重的沉降现象，相比于2021年，沉降的范围和速率均有所加大。点位（22.863°N，113.508°E）显示在2022年期间沉降量达到25 mm，且速度存在加快的趋势。

珠江三角洲水资源配置工程的输水线B2标段经过的区域地表覆盖多样，人类活动频繁，地面的位移形变可能对输水管线的安全施工及运营造成潜在的安全隐患。通过基于自然年划分的时间子集相干目标InSAR方法对区域2021—2022年哨兵1号雷达卫星数据的处理，发现输水管线在长莫村、鱼窝头村东部、庆胜站、B2标段项目部、鱼窝头村、留东村等六处线段出现不同程度的地表沉降加剧趋势，其中两处表现与人类施工活动有关。

4　结　语

本研究采用自然年时间子集的相干目标InSAR技术，对珠江三角洲水资源配置工程输水线B2标段及周边区域2021—2022年的地表形变进行监测。结果显示：2021年输水干线及南沙支线整体稳定，但局部区域如骏马大道（最大沉降速率12 mm·a^{-1}）、南沙鱼窝头查扣场（27 mm·a^{-1}）、粤海珠三角供水公司（21 mm·a^{-1}）已出现显著沉降。至2022年，沉降范围扩大且速率加剧，新增乐享庄园（10 mm·a^{-1}）、长兴一巷（13 mm·a^{-1}）等高风险点，鱼窝头村、留东村等区域最大沉降速率升至16 mm·a^{-1}，管线沿线呈现加速沉降趋势。时序累积形变曲线表明，部分区域沉降范围持续扩展，可能威胁输水结构安全。研究通过缓冲区分析与星载时序InSAR技术结合，快速获取大范围形变数据，精准识别地质灾害隐患，为工程风险防控与安全运维提供关键技术支持，验证了InSAR技术在基础设施长期监测中的高效性与实用性。

参考文献

[1] Ferretti C, Prati R F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens, 2001, 39(1): 8-20

[2] Ferretti A, Prati C, Rocca F, Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry [J]. IEEE Trans. Geosci Rem Sens, 2000, 38 (5):2 202-2 212

[3] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms [J]. IEEE Trans Geosci Rem Sens, 2002, 40:2 375-2 383

[4] Bateson L, Cigna F, Boon D, et al. The Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) InSAR Method to the South Wales Coalfield, UK [J]. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 2015, 34:249-257

[5] Hu F , Wu J, Chang L, et al. Incorporating Temporary Coherent Scatterers in Multi Temporal InSAR Using Adaptive Temporal Subsets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(10):7 658-7 670

[6] Smittarello D, d'Oreye J N M, Derauw D, et al. Pair Selection Optimization for InSAR Time Series Processing [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127, e2021JB022825. https://doi. org/10. 1029/2021JB022825

[7] Zheng X, Wang C, Tang Y, et al. Adaptive High Coherence Temporal Subsets SBAS-InSAR in Tropical Peatlands Degradation Monitoring[J].Remote Sensing, 2023, 15(18):4 461

[8] Lu Z, Zhang J, Zhang Y, et al. Monitoring and Characterizing Natural Hazards with Satellite InSAR Imagery [J]. Spa-

（下转第36页）