

# 南水北调河南长葛段多平台 InSAR 三维形变监测

刘辉<sup>1</sup>, 李世环<sup>2</sup>, 苗长伟<sup>3</sup>, 周泊辰<sup>2</sup>, 张宇<sup>3</sup>, 李世烜<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学 数字孪生水利高等研究院, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 3. 中核勘察设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:**【目的】为保障南水北调中线工程的安全运行,需监测其渠道表面形变情况。【方法】基于 2019 年 12 月至 2020 年 12 月 74 景 Sentinel-1A 数据,采用 SBAS-InSAR 技术,对南水北调河南段进行形变普查;引入 TerraSAR-X 升、降轨各 15 景数据,利用 DS-InSAR 技术,对河南长葛段进行多平台 InSAR 三维形变精确探测。【结果】南水北调河南段存在 22 处明显形变区,最大形变速率为 -98 mm/年,其中长葛段 1.6 km 渠道沉降超限明显,水磨河村附近渠道和禹州坤成煤矿附近均存在明显沉降漏斗,最大形变速率分别达 -26、-40 mm/年,前者仅存在垂直向形变,后者存在垂直向和东西向双向形变。【结论】将水磨河村附近渠道垂直向形变结果与二等水准数据进行对比验证,发现垂直向形变与二等水准数据变化趋势基本相同,最大误差不超过  $\pm 2$  mm,精度可靠,可为 InSAR 三维形变监测在水利工程灾害预警和防治方面提供理论和技术支撑。

**关键词:**南水北调工程;SBAS-InSAR;DS-InSAR;三维形变监测

**中图分类号:**P237

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-6792(2025)05-0001-13

南水北调工程是我国一项重大的水资源调配战略性工程,工程分为东线、中线、西线 3 条线路,中线工程于 2014 年 12 月正式通水,流经河南、河北、北京、天津 4 个省(直辖市),缓解了我国华北平原水资源短缺和分布不均等问题。河南省位于黄河中下游,既是水源地又是受水区。南水北调工程在河南省境内渠道长 731 km,其地形地貌、地质构造以及水文环境等对于工程建设和运行具有重要影响。传统的地面监测方法受地形、天气、时间等因素的限制,难以获取全面、精确的三维形变信息。因此,亟须一种高效准确的观测方法来获取南水北调河南段渠道精确的三维形变信息,以保障南水北调工程安全运营。

合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是一种极具潜力的空间对地观测技术<sup>[1-4]</sup>,具有监测范围大、精度高的优点,被广泛应用于地表形变、矿区沉降、

城市沉降等监测<sup>[5-10]</sup>。由于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)侧视成像的特点,InSAR 技术只能监测到雷达视线(Line of Sight, LOS)向的一维地表形变量,而非地表实际在东西向、南北向以及垂直向 3 个方向上的形变量,不能真实反映地表形变,而精准监测地表三维形变可以很好地实现灾害监测预警,如何获取精准的三维形变信息并减小监测误差成为重要的研究方向。国内外学者利用多方向、多平台 SAR 数据对监测三维地表形变进行研究,得到不同精度的监测结果<sup>[11-14]</sup>,但在融合多平台、多轨道数据时无法准确确定数据权重,这会极大地限制解算精度和增加监测误差。

文中首先以南水北调河南段为研究区域,基于 2019 年 12 月至 2020 年 12 月共 74 景 Sentinel-1A 影像,利用短基线集成孔径雷达干涉测量<sup>[15]</sup>(Small Baselines Subset Interferometric Synthetic Ap-

收稿日期/Received:2024-05-14

修回日期/Revised:2025-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41901411);河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2021GGJS073);河南省科技攻关项目(212102310052);中央引导地方科技发展资金资助(2025ZYDF033)。

第一作者:刘辉(1986—),男,教授,博、硕导,博士,从事 InSAR 和阵列 SAR 等方面的研究。E-mail:lh860801@163.com。

通信作者:周泊辰(1998—),男,满族,硕士研究生,从事 InSAR 三维形变方面的研究。E-mail:zbc\_0720@stu.ncwu.edu.cn。

erture Radar, SBAS-InSAR) 技术获取南水北调河南段全线的 LOS 向形变速率;其次,在 Sentinel-1A 数据的基础上引入 TerraSAR-X 升、降轨各 15 景数据,采用加权最小二乘法确定多平台 SAR 数据权重,利用分布式目标合成孔径雷达干涉测量(Distributed Scatter Interferometric Synthetic Aperture Radar, DS-InSAR) 技术进行多平台 InSAR 三维形变监测,获取南水北调河南长葛段沉降区域附近 LOS 向形变速率;最后,将 LOS 向与方位向形变联合解算,提取沉降区域东西向、南北向和垂直向 3 个方向的时序形变结果,并用二等水准测量结果来验证其精度和可靠性。

## 1 研究区概况及研究数据

### 1.1 研究区概况

南水北调河南段是中线工程的重要组成部分<sup>[16]</sup>,如图 1 所示,穿越黄河,沿太行山东麓蜿蜒北上,高填方、深挖方渠段遍布,地质条件复杂,地质灾害频发,需克服各种现实难题以保障水资源输送和调配。为了普查南水北调河南段渠道周边的形变区域,选取渠道左右各 3 km 缓冲区作为研究区。自 2016 年以来,长葛管理处通过监测发现,水磨河村附近渠道出现沉降,截至 2019 年 5 月,该处累计沉降量达 47.3~112.6 mm。

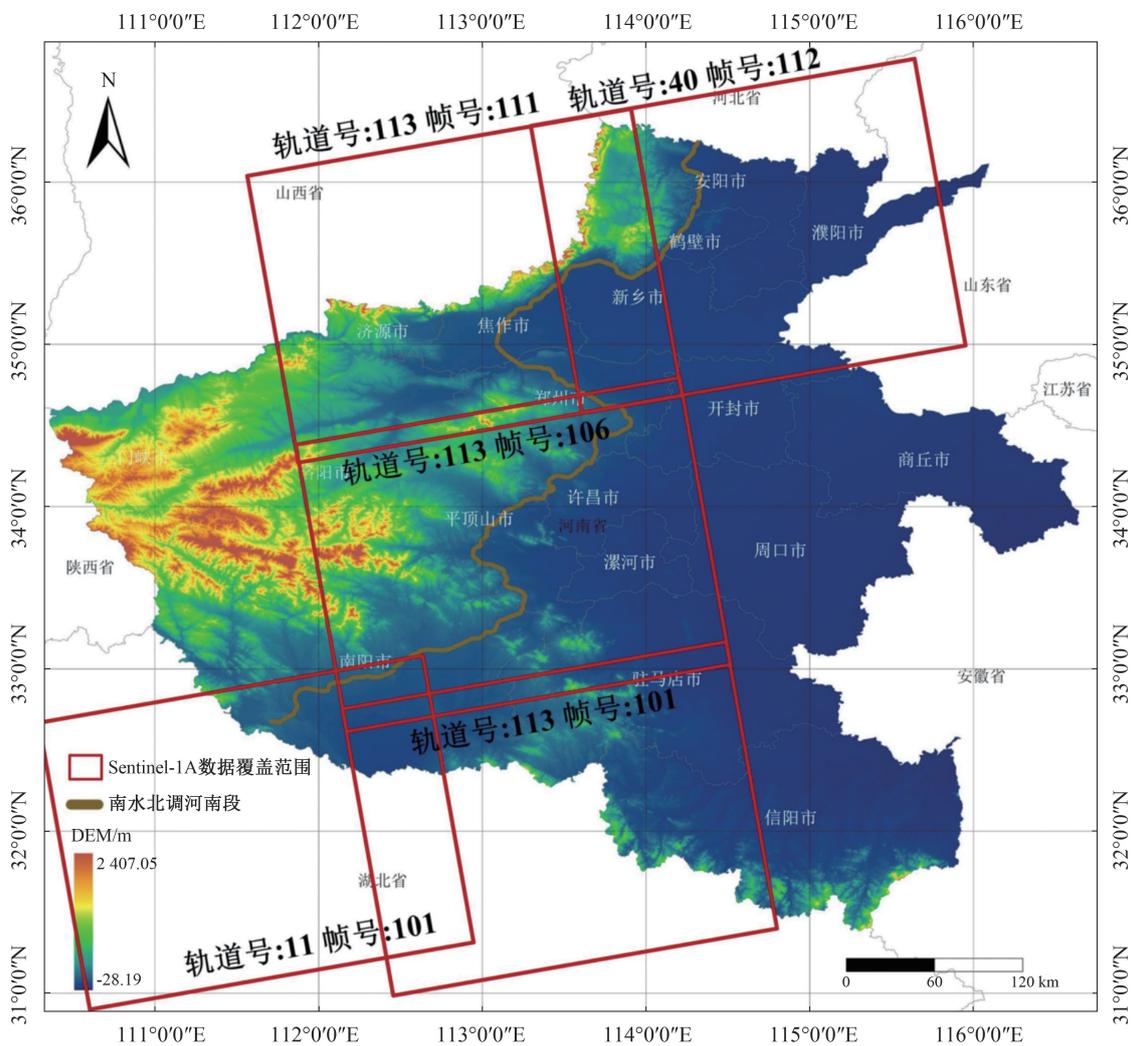


图 1 南水北调工程河南段概况及影像覆盖范围

Fig. 1 Overview and image coverage of the Henan section of the South-to-North Water Diversion Project

### 1.2 研究数据

选取覆盖南水北调河南段 2019 年 12 月至 2020 年 12 月的 74 景升轨 Sentinel-1A 影像、POD (Precise Orbit Ephemerides) 精密定轨星历数据进行河南段全线 InSAR 形变监测;选取覆盖南水北调

河南长葛段 2019 年 12 月至 2020 年 6 月的 15 景降轨 TerraSAR-X 影像、15 景升轨 TerraSAR-X 影像及 17 景升轨 Sentinel-1A 影像,进行长葛段水磨河村附近明显形变区的多平台 InSAR 三维形变监测;选取 2019 年 12 月至 2020 年 6 月的二等水准测量

数据进行 InSAR 监测结果的对比验证,其技术路线 如图 2 所示。

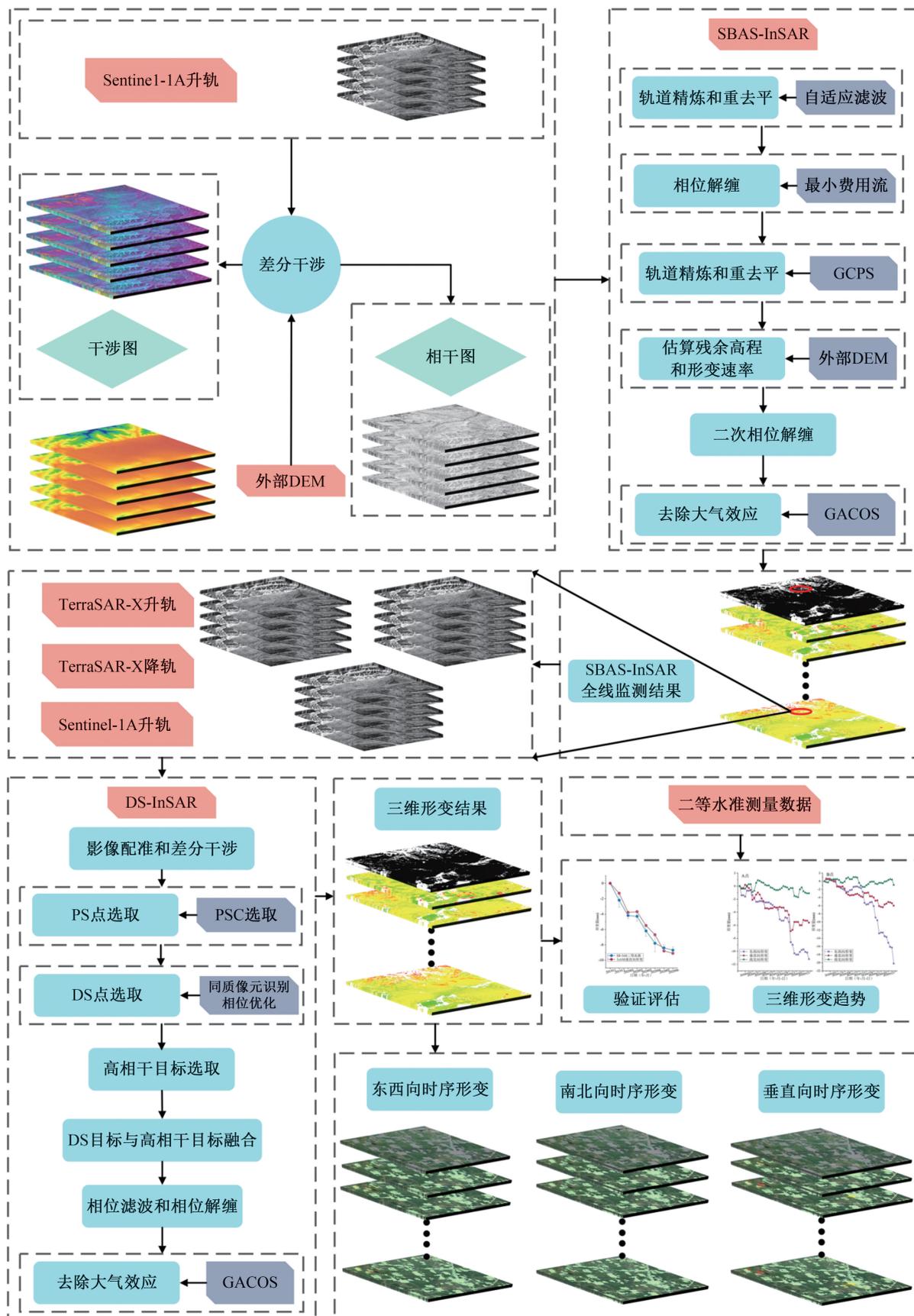


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technical flowchart

## 2 研究方法

### 2.1 SBAS-InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术的核心在于通过将已有的 SAR 影像数据划分为若干个小集合,基于短时空基线准则进行长时间序列分析,限制了长时空基线导致的失相干问题,利用最小二乘法和奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)有效求解了目标物的地表形变信息。但得到的结果分辨率较低,因此,该技术主要被应用于监测低分辨率、大尺度的形变<sup>[17]</sup>。

### 2.2 DS-InSAR 技术

DS-InSAR 技术能够融合传统时序 InSAR 技术的优势,基于永久散射体(Persistent Scatterer, PS)点和分布式散射体(Distributed Scatterer, DS)点进行地表形变监测,适用于地物分布特征以耕地、裸地以及少量人工建筑为主的区域<sup>[18-20]</sup>。DS-InSAR 技术主要步骤包括 DS 点选取、高相干目标选取、DS 点目标与高相干目标融合、相位解缠和去除大气效应。其中 DS 点选取步骤包含同质像元识别和相位优化两个关键步。

在同质像元识别步骤中,基于快速同质点选择(Fast Statistically Homogeneous Pixels Selection, FaSHPS)的均匀像元点识别法<sup>[21]</sup>是将假设检验问题转换为求解置信区间问题,具体如式(1)所示:

$$P\left\{\mu(O) - Z_{1-\frac{\delta}{2}} \frac{0.52\mu(O)}{\sqrt{NL}} < \bar{A}(O) < \mu(O) + Z_{1-\frac{\delta}{2}} \frac{0.52\mu(O)}{\sqrt{NL}}\right\} = 1 - \delta. \quad (1)$$

式中: $P\{\cdot\}$ 为概率; $O$ 为像元; $N$ 为影像数量; $L$ 为视数; $\bar{A}(O)$ 为像元  $O$  的振幅样本均值; $\mu(O) = A(O) = \sum_{i=1}^N A_i(O)/N$ ,为像元  $O$  的时序强度值的期望; $Z_{1-\frac{\delta}{2}}$ 为标准正态分布在置信度  $\delta$  时的分位点。

该方法将置信区间内平均光照强度在一定范围内的像元视为参考点  $O$  上的同质像素,对图像中的每一个像素点进行同质像元识别,超过设定阈值的点作为 DS 的初始候选点。在此基础上,利用最大似然估计(Maximum Likelihood, ML)方法对同质像元的相位进行优化,具体如式(2)所示:

$$\theta_{ML} = \arg \max \{ \mathbf{A}^H (-|\mathbf{S}|^{-1} \mathbf{T}) \mathbf{A} \}. \quad (2)$$

式中: $\theta_{ML} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ ,为优化后的相位; $\mathbf{A} = [e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_n}]^H$ ;  $\theta_1$  可取值为零,若  $\theta_1 = 0$ ,则仅需从  $N(N-1)/2$  个干涉相位中获得  $N-1$  个最优相位; $\mathbf{S}$  为未知的真实相干矩阵; $\mathbf{T}$  为样本相干矩阵,

用  $|\mathbf{T}|$  来估算  $|\mathbf{S}|$ ,将公式(2)简化为式(3):

$$\theta_{ML} = \arg \max \{ \mathbf{A}^H (-|\mathbf{T}|^{-1} \mathbf{T}) \mathbf{A} \} = \arg \max \{ \mathbf{A}^H (\mathbf{W}\boldsymbol{\phi}) \mathbf{A} \}. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W}$  为加权矩阵; $\boldsymbol{\phi}$  为干涉相位。

传统的权阵计算方法效率低,采用相干矩阵加权法以提高计算效率,并且可以有效避免矩阵求逆问题。具体如式(4)所示:

$$\theta_{ML} = \arg \max \{ \mathbf{A}^H \mathbf{T} \mathbf{A} \}. \quad (4)$$

用迭代法代替式(4)中常规求解非线性系统的算法,迭代获得优化后的干涉相位,即:

$$\theta_{ML}(k) = \arg \left\{ \sum_{m \neq n}^N T_{m,n} e^{j\theta_{ML}(k-1)} \right\}. \quad (5)$$

式中: $k$  为迭代次数,正整数; $m$  和  $n$  分别为不同日期影像对应的序号。

在此基础上,选择具有较高时间相干性的像素作为最后的 DS 点,具体如式(6)所示:

$$\Gamma_{DS} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{m=1}^N \sum_{m>n}^N \cos(\varphi_{m,n} - \theta_{m,n}). \quad (6)$$

式中: $\Gamma_{DS}$  为 DS 像元点的时间相干性; $\varphi_{m,n}$  为相位待检测像元的干涉相位; $\theta_{m,n}$  为初始干涉相位。

### 2.3 三维形变分解法

不同卫星提供的 SAR 数据的成像几何、雷达波长及卫星飞行轨道等都不尽相同,使得时序干涉 SAR 在多个卫星平台上实现三维形变监测成为可能。图 3 展示了一颗上升轨道 SAR 卫星对地目标侧视成像的几何关系。图中: $S$  为 SAR 卫星在成像过程中的位置; $O$  为高相干目标; $\theta$  为雷达 LOS 向与垂直向间的夹角; $\alpha$  为雷达航向角,代表正北方向与航向间的顺时针旋转角度,其值在  $0 \sim 2\pi$  范围内变化; $\mathbf{D}_n$ 、 $\mathbf{D}_e$ 、 $\mathbf{D}_\perp$  分别为  $P$  点在三维形变场中沿正北、正东和垂直向上的形变分量; $\mathbf{D}_{LOS}$  为  $O$  点在雷达 LOS 向上的一维形变,为  $O$  点的三维形变量在 LOS 向的投影之和。

根据三维形变分解基本原理和升降轨成像几何关系可得升降轨三维形变量计算公式,即:

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{LOS}^A = \mathbf{D}_\perp \cos\theta_{inc}^A - \mathbf{D}_n \cos\left(\alpha_{azi}^A - \frac{3\pi}{2}\right) \sin\theta_{inc}^A - \mathbf{D}_e \sin\left(\alpha_{azi}^A - \frac{3\pi}{2}\right) \sin\theta_{inc}^A, \\ \mathbf{D}_{LOS}^D = \mathbf{D}_\perp \cos\theta_{inc}^D - \mathbf{D}_n \cos\left(\alpha_{azi}^D - \frac{3\pi}{2}\right) \sin\theta_{inc}^D - \mathbf{D}_e \sin\left(\alpha_{azi}^D - \frac{3\pi}{2}\right) \sin\theta_{inc}^D. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{D}_{LOS}^A$ 、 $\mathbf{D}_{LOS}^D$  分别为升、降轨 LOS 向形变矢量; $\alpha_{azi}^A$ 、

$\alpha_{azi}^D$  分别为升、降轨的方位角,即北方向和卫星飞行方向的夹角; $\theta_{inc}^A$ 、 $\theta_{inc}^D$  分别为升、降轨的雷达入射角。

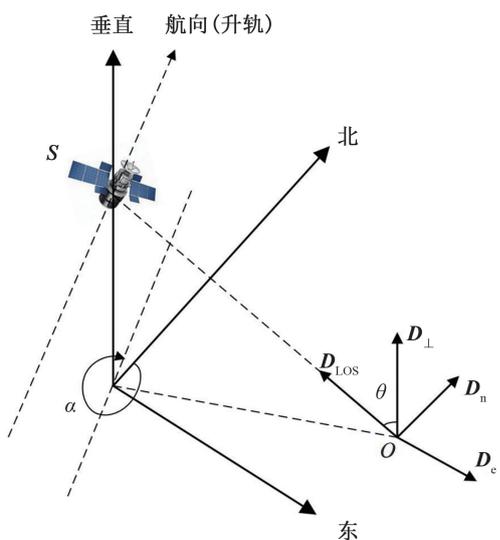


图 3 三维形变分解基本原理

Fig. 3 Basic principles of three-dimensional deformation decomposition

利用加权最小二乘法求解式(7)对应的  $n$  维方程组,对多个一维 LOS 向形变结果进行时序形变分解,计算出目标在垂直向、东西向和南北向上的形变分量和各个平台的系统误差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 河南段全线 SBAS-InSAR 形变监测

采用 SBAS-InSAR 技术处理覆盖南水北调河南段的 74 景升轨 Sentinel-1A 影像,得到南水北调河南段全线 2019 年 12 月至 2020 年 12 月 LOS 向的形变监测结果,如图 4 所示。图 4 展示了南水北调河南段整体形变结果,整个沿线存在 22 处形变区域,形变严重区域的最大形变速率为  $-98 \text{ mm/年}$ ,其中一些形变由渠道周围地面沉降引起,另有一些形变是渠道边坡自身发生的形变。其中形变较为典型的明显形变区域如图 5 所示。

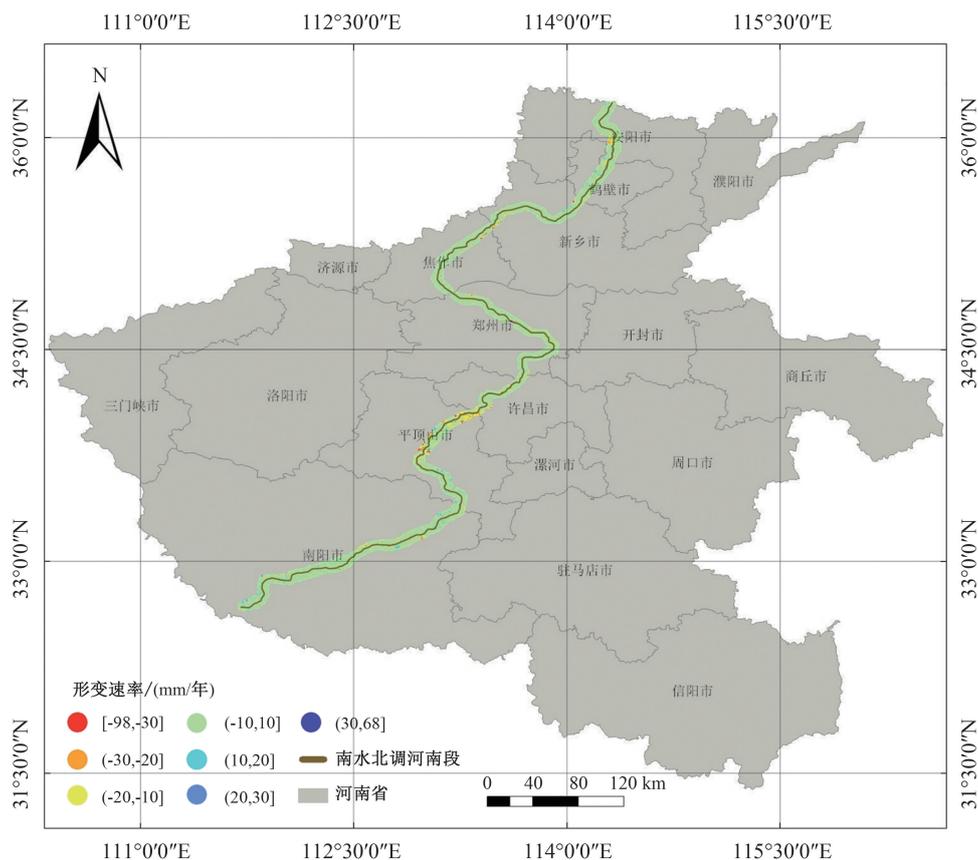


图 4 南水北调河南段全线 LOS 向形变速率结果

Fig. 4 The LOS deformation rate results of the Henan section of the South-to-North Water Diversion Project

图 5 展示了南水北调河南段 6 处明显形变区域的 LOS 向沉降结果,形变沿渠道分布不均,对渠道产生不同程度的影响。其中长葛段渠线 K345 及 K339 附近沉降超限明显,现场勘查得到桩号 K338

附近沉降是由煤矿采空区引起的;而桩号 K345 主干渠道附近出现明显沉降漏斗现象,沉降量超过设计警戒值,需重点关注。

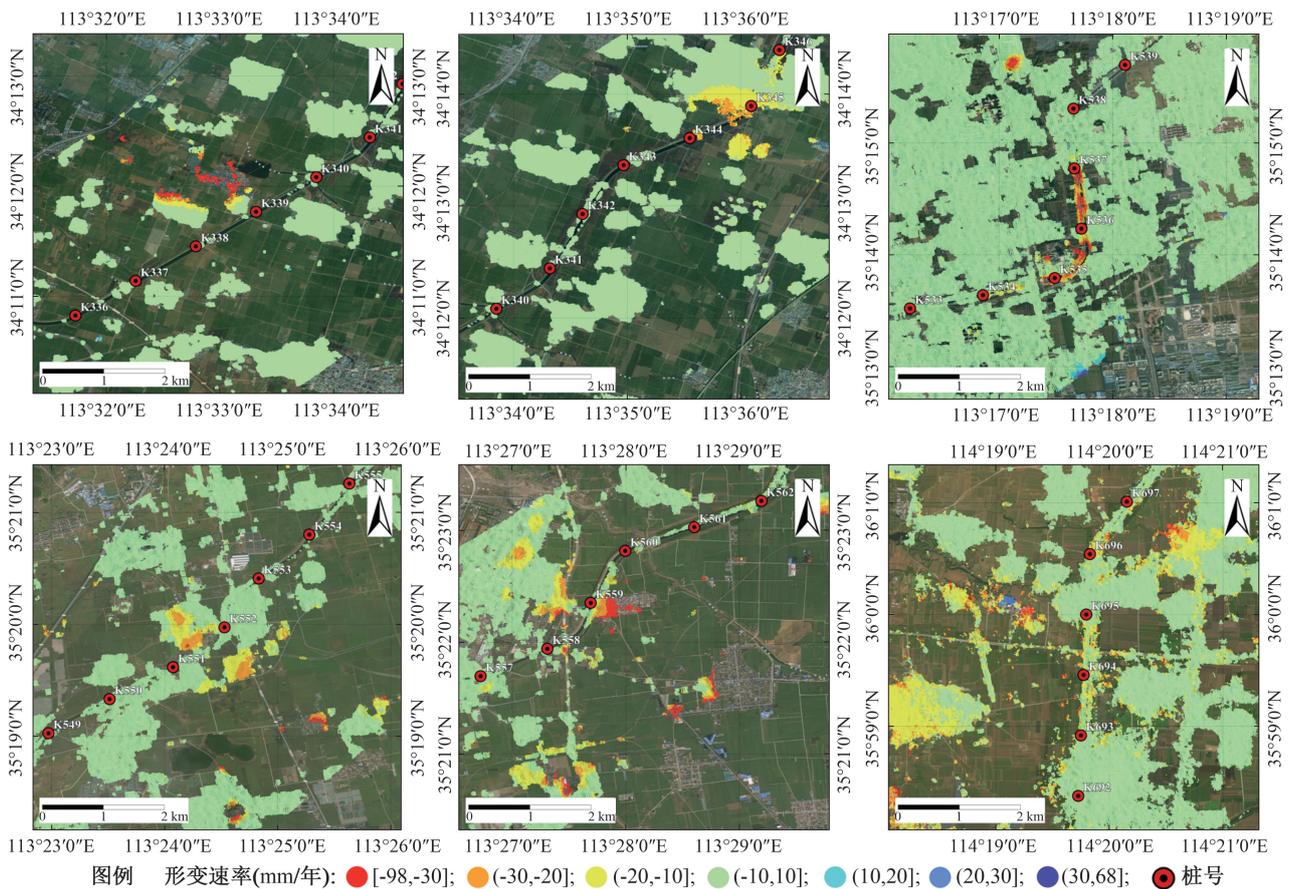


图5 南水北调河南段明显形变区 LOS 向形变速率结果

Fig. 5 LOS deformation rate in obvious deformation area of the Henan section of the South-to-North Water Diversion Project

### 3.2 长葛段 DS-InSAR 形变监测结果分析

由南水北调河南段全线监测结果发现,长葛段水磨河村附近渠道和禹州坤成煤矿附近沉降较为严重。为进一步精确探测长葛段三维形变状况,引入 TerraSAR-X 的升、降轨数据(各 15 景),结合已有的 Sentinel-1A 数据(17 景),对该区域进行多平台 InSAR 三维形变监测,得到长葛段 2019 年 12 月至 2020 年 6 月 3 个 LOS 向形变速率结果,如图 6 所示。

由于每组时序分析所选参考点以及卫星飞行角度的不同,结果会有所差异。图 6 中 3 个结果都显示,禹州坤成煤矿和水磨河村附近渠道存在明显沉降,以这 2 个区域为重点研究对象,选取监测点进行后续的精度验证。需要说明的是,这里所描述的形变都为 LOS 向形变。

针对水磨河村附近渠道发生明显沉降的现象,结合该处的地质、水文地质条件及采矿等工程活动,分析该处出现明显沉降的潜在原因可能是工程地质、采空塌陷和地下水水位持续下降等。具体如下:

1) 该处位于窑口村生产桥上游约 210 m 至盛

寨西沟倒虹吸下游约 180 m 之间,长 1.6 km。该段为上黏性土、下软弱岩结构,属半挖半填渠段,挖方深度 6~9 m,填高 1 m 左右。渠底板主要位于黄土状重粉质壤土和重粉质壤土中,渠坡主要由黄土状中重粉质壤土和重粉质壤土构成。黄土状中粉质壤土厚 1.5~10.0 m,具轻微湿陷性;黄土状重粉质壤土厚 1.8~7.0 m。该段地面沉降范围较大,填方段、挖方段均出现沉降,考虑岩土体工程地质性质,该处地面沉降由工程地质构造导致的可能性小。

2) 由现场勘查可知,在禹州坤成煤矿附近的公路处已经有地面沉降警示牌,煤矿采空区可能是导致渠道沉降的一个重要原因。虽然监测结果中禹州坤成煤矿附近渠道还未发生明显沉降,若该处发生沉降则该沉降可能会向渠道蔓延。

3) 图 7 展示了长葛段岩溶水系统的分布情况,浅层和中深层地下水位均呈现下降趋势,农业井灌的发展速度较快,农灌井大量开采浅层地下水,平原区浅层地下水开采消耗量较大,地下水径流缓慢,补给量不足,导致浅层地下水位持续下降,其中水磨河村处 30 m 浅井已干涸,浅层地下水埋深超过 30 m。地下水的多年大量集中开采和矿井排水

影响造成中深层地下水水位和深部岩溶地下水水位持续下降,中深层地下水水位已达 31.85 m。水磨河村所在位置属于白沙向斜北翼岩溶水子系统,2010 年以来,附近的煤矿进行了底板灌浆加固和疏放水,加大了矿井涌水量。该区域新生界孔隙含水层与岩溶含水层直接接触,岩溶水补给上部孔隙

地下水。附近的煤矿开采疏干地下水导致补给关系发生转化,进一步加剧孔隙地下水水位的持续下降,原饱和土体应力改变,加剧了土体的压实作用。因此,岩溶地下水大量开采疏干可能是导致南水北调河南长葛段渠道发生沉降的重要原因。

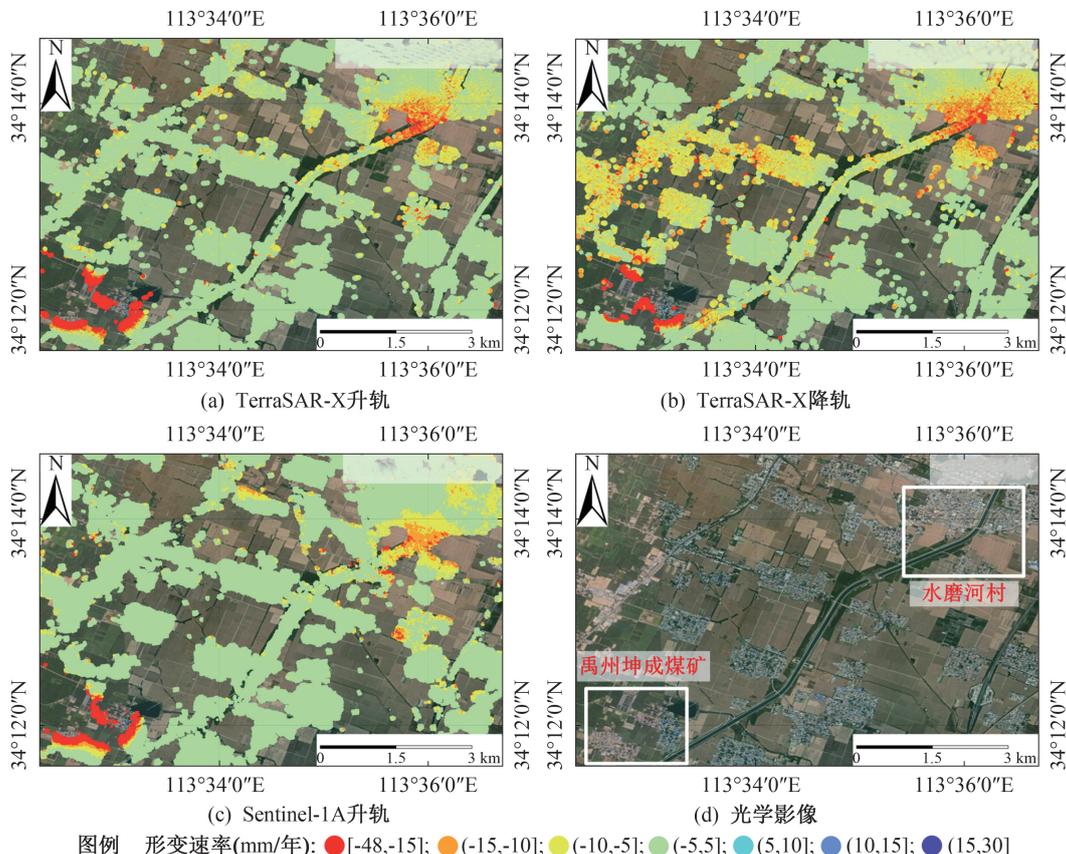


图 6 南水北调河南长葛段多平台 SAR 数据监测结果  
 Fig. 6 Multi-platform SAR data of the Henan Change section of the South-to-North Water Diversion Project



图 7 南水北调河南长葛段岩溶水系统分布  
 Fig. 7 Distribution of karst water system of the Henan Change section of the South-to-North Water Diversion Project

综上分析,引起渠道沉降的原因可能是:中深层地下水补给岩溶地下水,引起中深层地下水水位

下降和含水层被疏干,上覆第四系岩性结构,力学性质等发生变化,导致渠道沉降。

### 3.3 三维形变场分解

基于 DS-InSAR 技术对长葛段进行多平台三维形变监测,不同平台数据监测得到的形变点目标分布和密度存在差异。其中升轨 TerraSAR-X 数据集 DS 点密度为 22 088 个/km<sup>2</sup>,降轨 TerraSAR-X 数据集的为 22 936 个/km<sup>2</sup>,升轨 Sentinel-1A 数据集的为 4 717 个/km<sup>2</sup>。可知 Sentinel-1A 数据集 DS 点密度同 TerraSAR-X 数据集的相差较大,这是由二者数据分辨率差距较大导致的。

多平台、多轨道 SAR 数据具有不同的成像时间和时间参考基准,这会导致 InSAR 时序三维地表形变监测模型出现秩亏问题。SAMSONOV S 等<sup>[22]</sup>提出了吉洪诺夫(Tikhonov)正则化思想,实现了秩

亏方程的解算。利用升降轨 COSMO-SkyMed 数据获取了 Funu 滑坡的三维动态时序形变结果,这为解决三维地表形变监测提供了新的思路。针对多个平台 SAR 数据分辨率的不同,需要调整多平台 SAR 数据的多视系数、数据基准及坐标系,以保证同一类地物被选取的精度。文中在 Sentinel-1A 数据 DS 点数相差较多的基础上,定义升轨 Sentinel-1A 数据为主坐标系,降轨 TerraSAR-X 数据和升轨 TerraSAR-X 数据为辅坐标系。由于每个形变点的位置不尽相同,因此需要找到每个像素单元内的同名像点作为分解点。这里取 Sentinel-1A 数据像素最中间位置作为分解点,以 5 m 为半径进行搜索,采用 KD-树(K-dimension tree)算法进行最近邻搜索,以加快同名像点的查询速度<sup>[23]</sup>。

采用加权最小二乘法对多平台 InSAR 监测结果进行三维分解,其原理如图 8 所示。由于 SAR 卫星的运行轨迹多为近极地太阳同步轨道,即轨道平面与赤道面之间的夹角接近 90°,此时卫星方位向基本与南北向平行<sup>[24-26]</sup>,这导致雷达波束主要沿东西向扫描地面,形成沿轨道方向(东西向)的观测视线。当地面发生东西向的形变时,雷达 LOS 向与形变量方向近似垂直,有利于形变相位信息的积累和探测。相反,南北向的形变与雷达 LOS 向平行或接近平行时,形变引起的相位变化较小,不易被有效

捕捉到,此时,其对南北向的形变分量不敏感。

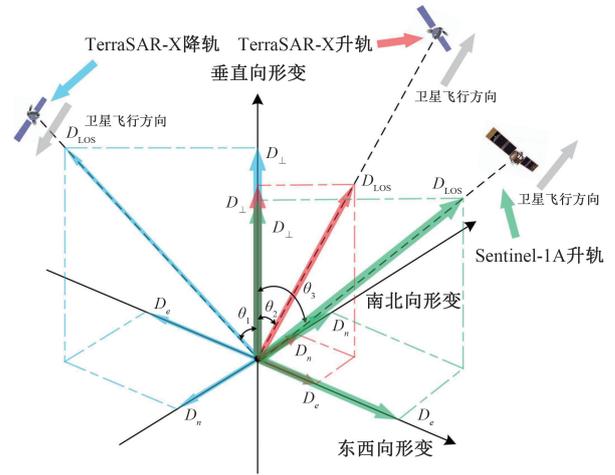
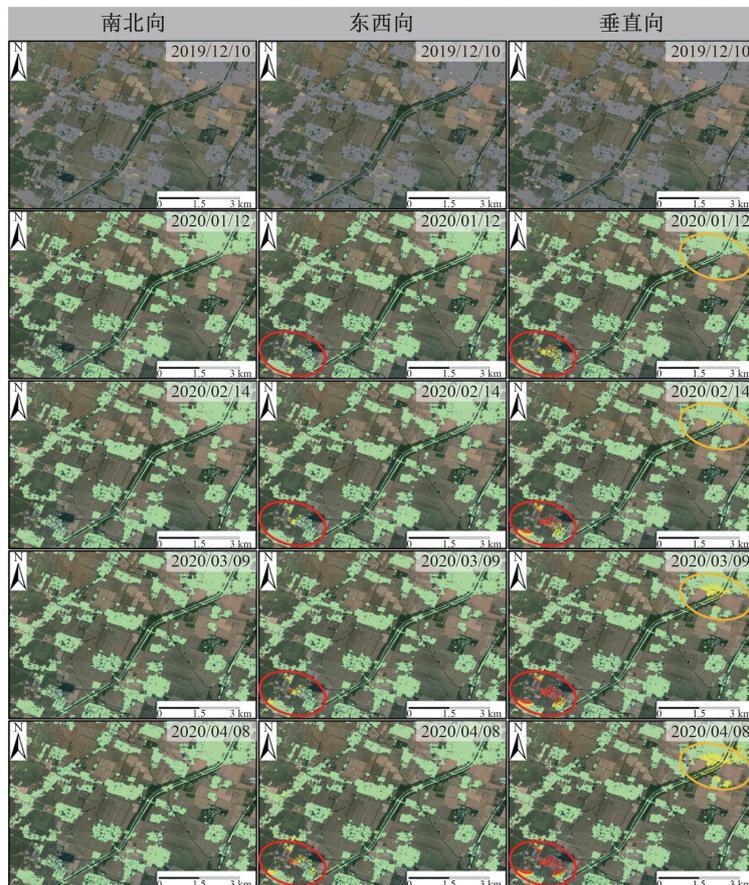


图 8 多平台 InSAR 三维分解示意图

Fig. 8 Three-dimensional decomposition map of multi-platform InSAR

南水北调河南长葛段三维分解后各方向分量结果如图 9 所示。图 9 中显示:南北向结果显示,2 个重点区域均没有被监测到明显沉降;东西向,禹州坤成煤矿附近区域沉降趋势明显,最大形变量达 -20 mm,水磨河村附近渠道无明显沉降;垂直向,禹州坤成煤矿附近区域沉降趋势明显,最大形变量达 -20 mm,水磨河村附近渠道可以看到明显沉降,最大形变量达 -13 mm。



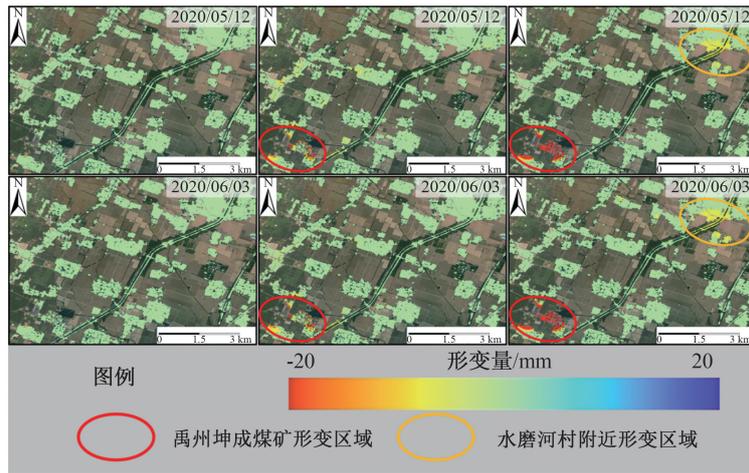


图 9 南水北调河南长葛段三维分解后各方向形变分量结果

Fig. 9 The deformation component results in various directions after 3D decomposition of the Change section in Henan Province of the South-to-North Water Diversion Project

由此可知,水磨河村附近渠道沉降主要呈垂直向,形变速率达 $-26\text{ mm/年}$ ,未出现东西向沉降趋势,需要严防垂直向沉降。禹州坤成煤矿附近沉降现象严重,东西向和垂直向都有不同程度的沉降趋势,形变速率达 $-40\text{ mm/年}$ ,沉降区距渠道有一定距离,未来可能有蔓延到渠道,需持续关注。

### 3.4 精度验证与趋势对比

为验证 InSAR 监测结果的准确性和可靠性,分别在禹州坤成煤矿附近和水磨河村 EM-547、EM-548、EM-549 以及 EM-551 处 4 个二等水准点位附近取 4 个形变监测点,如图 10 所示。

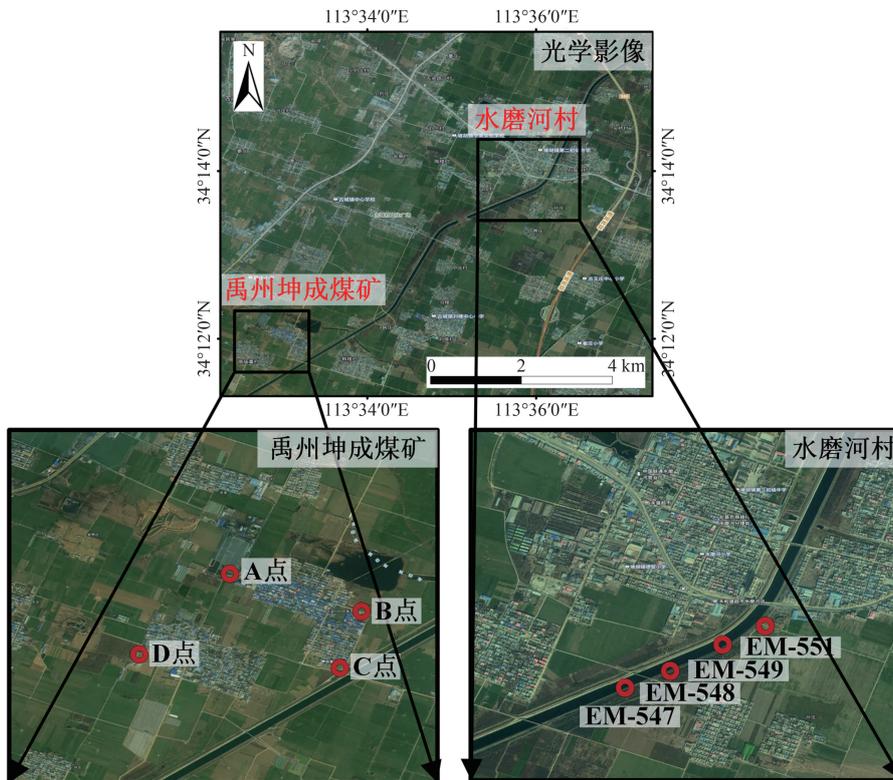


图 10 南水北调河南长葛段形变监测点位分布图

Fig. 10 Distribution map of deformation monitoring points of the Henan Change section of the South-to-North Water Diversion Project

图 9 中显示水磨河村附近渠道形变主要以垂直向为主,且二等水准测量的形变也是垂直于地表

方向。因此,仅采用垂直向形变结果同二等水准测量结果进行对比验证,结果如图 11 所示。图 11 中显

示,最大形变量为-10.3 mm,最小形变量-5.8 mm,垂直向形变趋势与二等水准的趋势基本相同,最大误

差不超过±2 mm,依据 InSAR 形变监测精度规范<sup>[27]</sup>,结果可靠。

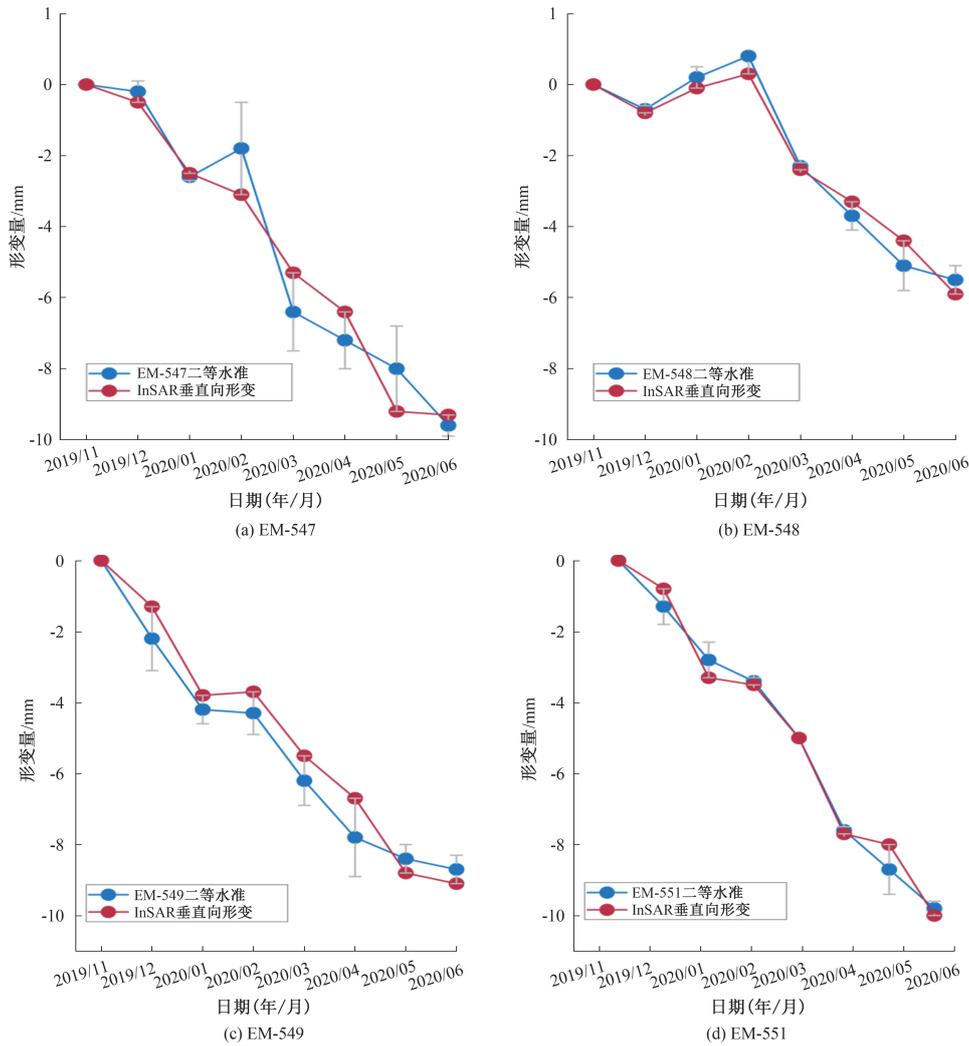
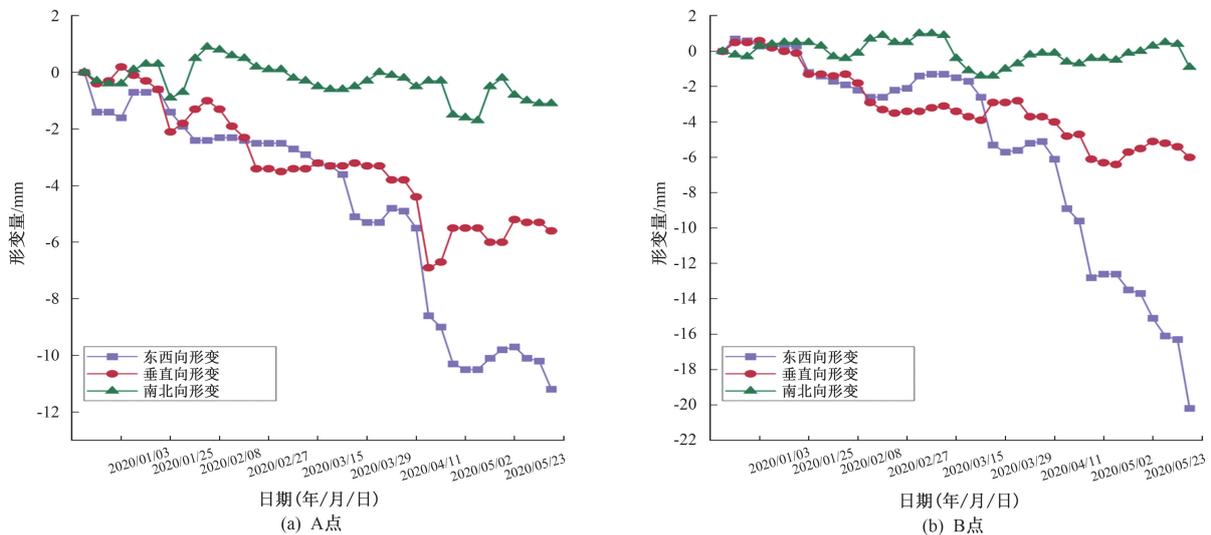


图 11 水磨河村附近渠道垂直向形变分量同二等水准数据对比

Fig. 11 Comparison of vertical deformation components and the second-order leveling data of the channel near Shuimohe Village

禹州坤成煤矿附近因东西向和垂直向都有明显形变趋势,因此在每个形变监测点处分别提取并

分析东西向、南北向和垂直向 3 个方向形变趋势,结果如图 12 所示。



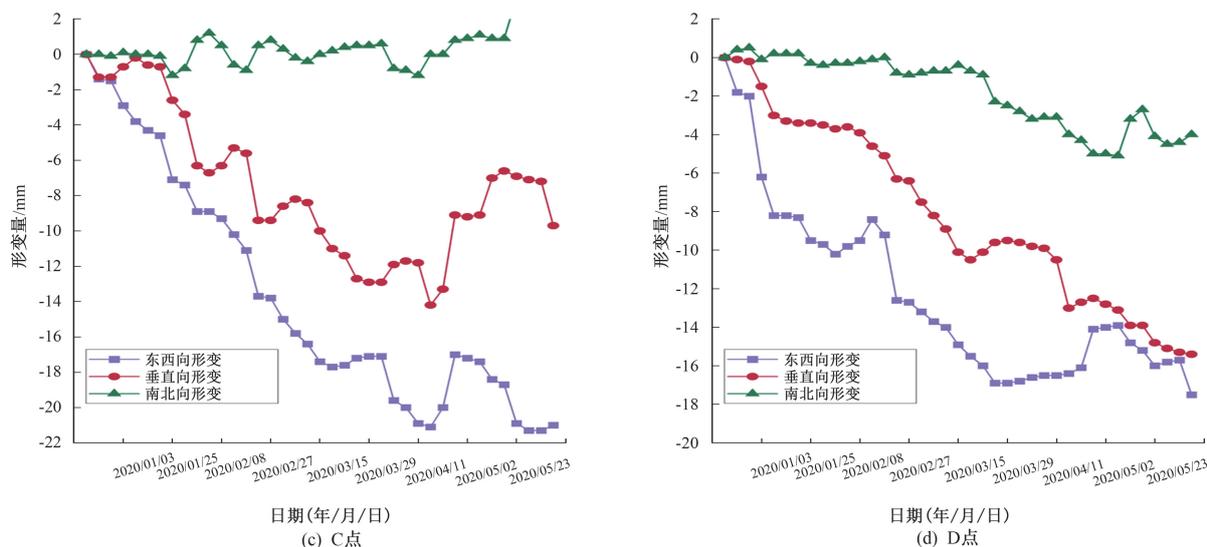


图 12 禹州坤成煤矿形变监测点位三维形变趋势

Fig. 12 The three-dimensional deformation trend of deformation monitoring points near Kuncheng Coal Mine in Yuzhou

由图 12 可知,4 个监测点的东西向形变都较大,垂直向形变次之,南北向形变保持在一定范围。因此,禹州坤成煤矿形变以东西向形变为主,垂直向形变为辅。

#### 4 结论

采用由粗到细,由一维到三维,由普查到详查的方法监测和分析了南水北调河南长葛段的形变状况。主要结论如下:

1) 采用 SBAS-InSAR 技术获取了 2019 年 12 月至 2020 年 12 月南水北调河南段全线 22 处明显形变区 LOS 向形变速率结果,严重区域最大形变速率为  $-98 \text{ mm/年}$ 。

2) 采用 DS-InSAR 技术获取了南水北调河南长葛段多平台 SAR 数据 LOS 向形变情况,其中水磨河村附近渠道和禹州坤成煤矿附近存在明显沉降漏斗现象,最大形变速率分别达  $-26$ 、 $-40 \text{ mm/年}$ 。

3) 采用多平台 SAR 数据对水磨河村和禹州坤成煤矿进行三维形变时序分解,得到其东西向、垂直向及南北向形变的分布特征与时间演变规律,其中禹州坤成煤矿附近形变以东西向为主,垂直向为辅。水磨河村仅垂直向存在形变趋势,形变速率达  $-26 \text{ mm/年}$ 。由于 SAR 卫星的飞行轨道原因,对南北向形变不敏感,禹州坤成煤矿附近和水磨河村附近在南北向均没有明显形变趋势。

4) 采用二等水准测量结果与水磨河村附近渠道相同监测点垂直向形变进行对比验证,对禹州坤成煤矿附近监测点进行了三维形变趋势分析。结

果表明,二等水准数据与 InSAR 监测结果形变趋势一致,最大误差不超过  $\pm 2 \text{ mm}$ ,验证了 InSAR 技术的可靠性和准确性。

本文采用多平台 SAR 数据获取不同平台的 LOS 向监测结果,采用加权最小二乘法构建模型确定数据权重,融合分解得到多平台 InSAR 三维时序形变,虽获取了该区域的三维形变结果,但结果精度还需进一步提高。下一步将优化解算模型来进一步提高精度,从而获取准确的三维形变信息。

#### 参 考 文 献

- [1] 靳国旺,徐青,张红敏. 合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:国防工业出版社,2014. [JIN G W, XU Q, ZHANG H M. Interferometric Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.]
- [2] 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):1717-1733. [ZHU J J, LI Z W, HU J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.]
- [3] 刘辉,徐青,靳国旺,等. 非理想航迹城市建筑群 MIMO 下视阵列 SAR 三维仿真[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(3): 413-421, 442. [LIU H, XU Q, JIN G W, et al. Urban buildings MIMO downward-looking array SAR 3D simulation under non-ideal trajectory[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3): 413-421, 442.]
- [4] 胡俊,李志伟,朱建军,等. InSAR 三维形变测量理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2021. [HU J, LI Z W, ZHU J J, et al. Theory and Application of Monitoring 3D Deformations with InSAR[M]. Beijing: Science Press, 2021.]

- [5] LIU H, ZHOU B C, BAI Z C, et al. Applicability assessment of multi-source DEM-assisted InSAR deformation monitoring considering two topographical features [J]. *Land*, 2023, 12(7):1284.
- [6] 刘辉, 靳国旺, 张红敏, 等. DEM 辅助的 InSAR 零中频处理基线估计方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3):79-84. [LIU H, JIN G W, ZHANG H M, et al. DEM assisted zero intermediate frequency baseline estimation method of InSAR[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2017, 45(3):79-84.]
- [7] 肖儒雅, 何秀凤. 时序 InSAR 水库大坝形变监测应用研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(9):1334-1341. [XIAO R Y, HE X F. Deformation monitoring of reservoirs and dams using time-series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9):1334-1341.]
- [8] 戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(12):1778-1786, 1796. [DAI K R, ZHUO G C, XU Q, et al. Tracing the pre-failure two-dimensional surface displacements of Nanyu landslide, Gansu province with radar interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12):1778-1786, 1796.]
- [9] 晏霞, 刘媛媛, 赵振宇. 利用时序 InSAR 技术监测南水进京后北京平原地区的地面沉降[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(6):2351-2361. [YAN X, LIU Y Y, ZHAO Z Y. Land subsidence monitoring after the start of the South-to-North Water Transfer in the Beijing plain based on multi-temporal InSAR[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(6):2351-2361.]
- [10] 刘辉, 朱梦源, 赵文飞, 等. 基于 PS-InSAR 的小浪底土石坝形变监测与稳定性模拟[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(1):1-10. [LIU H, ZHU M Y, ZHAO W F, et al. Deformation monitoring and stability simulation of Xiaolangdi soil and rock dam based on PS-InSAR[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(1):1-10.]
- [11] WRIGHT T J, PARSONS B E, LU Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1):L01607.
- [12] GRAY L. Using multiple RADARSAT InSAR pairs to estimate a full three-dimensional solution for glacial ice movement[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(5):L05502.
- [13] CATALAO J, NICO G, HANSSEN R, et al. Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-D terrain displacement velocity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6):2354-2360.
- [14] 胡俊. 基于现代测量平差的 InSAR 三维形变估计理论与方法[D]. 长沙:中南大学, 2013. [HU J. Theory and method of estimating three-dimensional displacement with InSAR based on the modern surveying adjustment [D]. Changsha: Central South University, 2013.]
- [15] BERARDINO P, COSTANTINI M, FRANCESCHETTI G, et al. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy)[J]. *Engineering Geology*, 2003, 68(1/2):31-51.
- [16] 刘辉, 赵文飞, 刘先林, 等. 南水北调中线工程高填方渠道 PS-InSAR 形变监测[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(6):1-9. [LIU H, ZHAO W F, LIU X L, et al. PS-InSAR deformation monitoring of high fill canal of the South-to-North Water Diversion middle route project[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2023, 44(6):1-9.]
- [17] 杨红磊, 彭军还, 康志忠, 等. InSAR 技术原理及实践[M]. 北京:科学出版社, 2021. [YANG H L, PENG J H, KANG Z Z, et al. Principle and Practice of InSAR Technology [M]. Beijing: Science Press, 2021.]
- [18] 盛磊. 基于 DS-InSAR 技术的高山峡谷区滑坡三维形变提取及厚度反演[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023. [SHENG L. Three-dimensional deformation extraction and thickness inversion of landslides in alpine and canyon region based on DS-InSAR technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.]
- [19] 赵峰, 张雷昕, 王腾, 等. 城市地表形变的双极化 Sentinel-1 数据极化时序 InSAR 技术监测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(9):1507-1514. [ZHAO F, ZHANG L X, WANG T, et al. Polarimetric persistent scatterer interferometry for urban ground deformation monitoring with Sentinel-1 dual polarimetric data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9):1507-1514.]
- [20] 刘辉, 靳国旺, 张红敏, 等. DEM 辅助的山区 InSAR 相位解缠[J]. *测绘科学技术学报*, 2017, 34(2):215-220. [LIU H, JIN G W, ZHANG H M, et al. Phase unwrapping assisted by DEM of InSAR for mountainous terrain[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, 34(2):215-220.]
- [21] 蒋弥, 丁晓利, 李志伟. 时序 InSAR 同质样本选取算法研究[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(12):4767-4776. [JIANG M, DING X L, LI Z W. Homogeneous pixel selection algorithm for multitemporal InSAR[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(12):4767-4776.]
- [22] SAMSONOV S, DILLE A, DEWITTE O, et al. Satellite interferometry for mapping surface deformation time series in one, two and three dimensions; a new method illustrated on a slow-moving landslide [J]. *Engineering Geology*, 2020, 266:105471.
- [23] 汪嘉业, 王文平, 屠长河, 等. 计算几何及应用[M]. 北京:科学出版社, 2011. [WANG J Y, WANG W P, TU C H, et al. Computational Geometry and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 2011.]

- [24] LIU H, YUE J W, LIU W K, et al. Multi-baseline phase unwrapping with robust branch and bound pure integer programming algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161:107352.
- [25] 马艳鸽. 基于 GPS-InSAR 数据融合的地表三维形变场获取方法研究[D]. 西安:长安大学, 2019. [MA Y G. Establishment of three-dimensional surface deformation field by GPS-InSAR data fusion[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.]
- [26] 杨雪艳. InSAR 高精度时序地表三维形变模型研究[D]. 西安:长安大学, 2022. [YANG X Y. Research on high-precision time series 3D deformation model of InSAR [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.]
- [27] 中国地质灾害防治工程行业协会. 地质灾害 InSAR 监测技术指南(试行): T/CAGHP 013—2018[S/OL]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018. [2024-8-22]. <https://std.cgs.gov.cn/webfile/upload/2024/03-14/03-11-300177-726616753.pdf>. [China Association of Geological Hazard Prevention. Guideline of InSAR Monitoring for Geo-hazard: T/CAGHP 013—2018[S/OL]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018. [2024-8-22]. <https://std.cgs.gov.cn/webfile/upload/2024/03-14/03-11-300177-726616753.pdf>.]

## Multi-platform InSAR Three-Dimensional Deformation Monitoring of Henan Change Section of South-to-North Water Diversion Project

LIU Hui<sup>1</sup>, LI Shihuan<sup>2</sup>, MIAO Changwei<sup>3</sup>, ZHOU Bochen<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, LI Shixuan<sup>3</sup>

(1. Advanced Research Institute for Digital-Twin Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. China Nuclear Industry Survey Design & Research Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** **[Objective]** To ensure the safe operation of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, it is necessary to monitor channel surface deformation. **[Methods]** Based on 74 Sentinel-1A images from December 2019 to December 2020, SBAS-InSAR technology was applied to conduct a comprehensive survey of deformation in the Henan section of the South-to-North Water Diversion Project. Additionally, 15 ascending and 15 descending TerraSAR-X images were integrated using DS-InSAR technology for precise multi-platform InSAR detection of three-dimensional deformation in the Henan Change section. **[Results]** Twenty-two significant deformation zones were identified along the Henan section, with a maximum deformation rate of -98 mm/year. Notably, a 1.6 km channel segment in Change exhibited excessive settlement. Settlement funnels were observed in the channel near Shuimohe Village and the Kuncheng Coal Mine in Yuzhou, with peak deformation rates reaching -26 mm/year and -40 mm/year, respectively. The former showed only vertical deformation, while the latter displayed both vertical and east-west bidirectional deformation. **[Conclusion]** Verification against second-order leveling data confirms that vertical deformation of the channel near Shuimohe Village aligns closely with leveling trends, with a maximum error of  $\pm 2$  mm, indicating reliable accuracy. This provides theoretical and technical support for the application of InSAR three-dimensional deformation monitoring in disaster early warning and prevention in hydraulic engineering.

**Keywords:** South-to-North Water Diversion Project; SBAS-InSAR; DS-InSAR; three-dimensional deformation monitoring

(编辑:杜明侠)