

融入坐标—时间函数(CT-PIM)的矿区时序 InSAR 形变预计—以淮安盐矿为例

张腾飞, 邢学敏, 彭葳, 朱琺, 刘祥彬, 葛家旺, 雷敏超

1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114;
2. 长沙理工大学 交通测绘雷达遥感应用研究所, 长沙 410114

摘要: 对矿区开展长期形变监测和后续形变预计对于预防矿山开采所引发的潜在安全问题和矿山生态环境保护具有十分重要的意义。利用合成孔径雷达干涉测量技术 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 与概率积分法 PIM (Probability Integral Method) 结合是较为有效的矿区形变预计方法。然而, 目前矿区时序 InSAR 形变建模环节中大多数采用纯经验数学模型, 未顾及开采沉陷机制, 严重影响获取的形变观测值的精度; 不准确的 InSAR 形变观测值将误差传递至后续形变预计, 进而导致误差累积。本文将坐标—时间函数 CT (Coordinate Time) 引入时序 InSAR 建模环节, 构建了坐标—时间函数预计模型 (CT-PIM) 以取代传统纯经验数学模型; 再基于 InSAR 相位观测值求解未知参数, 将构建的 CT-PIM 直接用于矿区形变预计, 避免了误差的传递, 以改善形变预计精度。分别开展了模拟实验和真实实验对提出预计方法进行验证。模拟实验显示: 模型预计获取的时序形变与模拟真值的均方根误差 (RMSE) 为 ± 4.6 mm。真实实验利用覆盖淮安市一盐矿区的 35 景 Sentinel-1A SAR 卫星影像开展, 获取了研究区域 2019 年 3 月 30 日至 2019 年 7 月 28 日的预计结果, 结果显示测区最大预计沉降量为 152 mm。本文所提方法相比传统多速率模型, 建模精度提升了 38.2%; 相比传统静态概率积分预计方法获取的形变结果, 精度提升了 39.1%。本文方法为预防盐矿区采矿引起的地质灾害问题提供了有力的工具, 为盐矿区生产安全和生态环境保护提供参考。

关键词: 遥感, InSAR, 矿区, 坐标—时间函数, 地表沉陷, 形变预计

中图分类号: P237/P2

引用格式: 张腾飞, 邢学敏, 彭葳, 朱琺, 刘祥彬, 葛家旺, 雷敏超. 2024. 融入坐标—时间函数 (CT-PIM) 的矿区时序 InSAR 形变预计—以淮安盐矿为例. 遥感学报, 28(6): 1615–1631

Zhang T F, Xing X M, Peng W, Zhu J, Liu X B, Ge J W and Lei M C. 2024. Incorporation of Coordinate–Time Function (CT–PIM) time-series InSAR deformation prediction for salt mining areas: Case study of the Huaian Salt Mine. National Remote Sensing Bulletin, 28(6): 1615–1631 [DOI:10.11834/jrs.20222172]

1 引言

中国是世界上拥有极为丰富盐类矿产资源的少数国家之一, 已探明的储量约为 44500 亿吨。由于盐矿区开采方式的全方位性和不确定性, 采空区易出现塌陷和卤水外泄, 严重破坏矿区生态环境 (Zhang 等, 2019)。对盐矿区开展长期动态的形变监测与形变预计对于预防矿山开采所引发的潜在安全问题和矿山生态环境保护具有十分重要

的意义。

多时相合成孔径雷达差分干涉测量技术 MT-InSAR (Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Rada) 相比传统 InSAR 技术有着诸多优势, 已在矿区地表形变监测 (Gama 等, 2017; 肖亮等, 2019; Chen 等, 2020) 中体现出巨大潜力。然而, 单一 MT-InSAR 技术只能实现 SAR 影像覆盖时间周期内形变的监测, 无法实现 SAR 影像后期形变的预计。为解决这一局限, 大量学者

收稿日期: 2022-04-21; 预印本: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42074033, 51878078, 41701536, 41904003, 61701047); 湖南省自然科学基金青年基金 (编号: 2017JJ3322, 2019JJ50639, 2020JJ5571); 湖南省教育厅重点项目 (编号: 18A148, 19C0042); 洞庭湖生态环境遥感监测湖南省重点实验室开放项目 (编号: 2021-011); 中国水利水电第八工程局有限公司科研项目 (编号: 2023060); 长沙市杰出创新青年培养计划项目 (编号: kq2209011)

第一作者简介: 张腾飞, 研究方向为矿区时序 InSAR 建模与形变预计。E-mail: tengfei@stu.csust.edu.cn

通信作者简介: 邢学敏, 研究方向为时序 InSAR 技术在地表变形监测中的应用。E-mail: xuemin.xing@csust.edu.cn

将概率积分法与 InSAR 技术结合用于矿区形变预计 (Yang 等, 2017a, 2018a, 2016; Fan 等, 2018; Xing 等, 2021)。其基本思想是利用 MT-InSAR 技术获取的地表形变序列作为概率积分预计模型 PIM (Probability Integral Method) 的观测值以反演概率积分预计参数, 再用概率积分预计模型实现矿区形变预计。然而, 这一方法存在一些局限: 首先, MT-InSAR 形变建模环节大多采用传统纯经验数学模型 (如: 线性模型、季节性模型、多项式模型等) 来拟合形变随时间演化的规律, 没有顾及开采沉陷机制, 不能真实准确地反应矿区开采形变规律, 造成形变观测值不准确; 其次, 用不准确的 InSAR 形变观测值来估计 PIM 参数, 将会导致误差累积传递至后续形变预计; 最后, 形变监测中采用的数学模型与后续预计采用的 PIM 在理论上并不一致, 这不利于形变结果的物理解译。

本文采用 SBAS-InSAR 技术作为盐矿区形变监测的主要手段, 利用矿区动态地表形变的坐标—时间函数 CT (Coordinate Time) (朱广轶等, 2011), 构建基于 InSAR 差分干涉相位与概率积分参数之间的时序函数模型 (CT-PIM), 以替换传统 InSAR 形变模型, 新模型融入了概率积分参数, 顾及了矿区开采沉陷机制, 更具物理意义; 这一模型可

$$W(x,t) = \begin{cases} \frac{w(x)}{2} \left(\operatorname{erf}(\sqrt{\pi}) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{v_m t - nH - r}{r}\right) \right), & x \leq nH \\ \frac{w(x)}{2} \left(\operatorname{erf}(\sqrt{\pi}) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \left(\frac{v_m t - r - x + \frac{H}{a + bx} - \frac{H(a + bx)}{3}}{r} \right) \right) \right), & nH < x \leq 1.3r \\ \frac{w_0}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}\right) + \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{v_m t + H/\tan\omega - 2x}{r}\right) \right), & x > 1.3r \end{cases} \quad (2)$$

式中, x 表示矿区任意一高相干点的横坐标; $w(x)$ 为静态下沉量可由 $w(x) = \frac{w_0}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{x}{r}\right) + 1 \right)$ 计算; erf 为概率积分函数, 可表示为 $\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r} x\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{\pi}}{r} x} e^{-u^2} du$ (u 为积分参数, $r = \frac{H}{\tan\beta}$ 为主要影响半径, H 为开采深度, $\tan\beta$ 为主要影响角正切值); nH 为启动距离, 即地表开始移动时工作面的推进距离; n 为启动系数、 ω 为静态超前影响角; v_m 是工作面在匀速开采条件下的推进速度; 系数

利用 InSAR 相位观测值直接求解概率积分预计参数, 且可直接用于 SAR 影像覆盖后期形变的预计, 避免了误差的二次传递, 可极大提高形变预计精度, 为盐矿区生产安全和生态环境保护提供数据支持。

2 方法原理

2.1 动态坐标—时间函数概率积分模型 (CT-PIM)

朱广轶等 (2011) 将时间参数融入传统静态概率积分预计模型, 提出用于矿山地表动态变形预计的坐标—时间函数。因此, 可构建地表下沉与概率积分参数间的时间函数 (CT-PIM) 模型如下

$$W(x,y,t) = \frac{1}{w_0} W(x,t) W(y,t) \quad (1)$$

式中, $W(x, y, t)$ 为工作面推进时刻为 t 时矿区地表任一点 (x, y) 的沉降量。 w_0 为该地质采矿条件下的最大沉降值 $w_0 = mq \cdot \cos\alpha$; m 表示开采厚度, q 表示下沉系数, α 表示矿层倾角。 $W(x, t)$ 和 $W(y, t)$ 可表示如下:

(1) 当矿区开采工作面倾向充分采动时, 走向未充分采动时:

$$a = \frac{117r - \omega nH}{1.3r + nH}, \quad b = \frac{\omega - 90^\circ}{1.3r + nH}$$

(2) 当矿区开采工作面走向充分采动, 倾向未充分采动时, 地表下沉 $W(y, t)$ 为

$$W(y,t) = \frac{w_0}{2} \left(\operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{y}{r_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi} \frac{y-L}{r_2}\right) \right) \quad (3)$$

式中, y 表示矿区任意一高相干点的纵坐标; $r_1 = \frac{H_1}{\tan\beta_1}$ 、 $r_2 = \frac{H_2}{\tan\beta_2}$ 分别为下、上山影响半径; H_1 、 H_2 分别为下、上山的采深, 可根据式 $H_1 = H - \frac{D_1}{2} \sin\alpha$ 、 $H_2 = H + \frac{D_1}{2} \sin\alpha$ 计算; $L = (D_1 - s_1 - s_2)$

$\frac{\sin(\theta_0 - \alpha)}{\sin \theta_0}$ 为倾向工作面计算长度； D_1 为工作面倾向斜长； s_1 、 s_2 分别为下、上山拐点偏移距； $\theta_0 = 90^\circ - k\alpha$ 为开采影响传播角； k 为小于 1 的常数。

需要说明的是，当矿区开采工作面走向未达到充分采动时，则要在式 (2) 获取的地表下沉 $W(x, t)$ 中，融入走向采动程度系数 C_{xm} ，可根据式 $C_{xm} = \frac{W_{xm}}{W_0} < 1$ 计算；式中 W_{xm} 是假设倾向已经达到充分采动，利用式 (2) 中第一式求出 $W(x, t)$ 的最大值 W_{xm} 。而当矿区开采工作面走向未达到充分采动时，需要在式 (3) 获取的地表下沉 $W(y, t)$ 基础上，乘以一个小于 1 的走向采动程度系数 C_{ym} ，可根据式 $C_{ym} = \frac{W_{ym}}{W_0} < 1$ 计算；式中 W_{ym} 是假设走向已经达到充分采动时利用式 (3) 求出的 $W(y, t)$ 的最大值 W_{ym} (Yang 等, 2016)。

2.2 基于 CT-PIM 的时序 InSAR 建模

假设获取同一区域 $N + 1$ 景 SAR 影像，共生成 M 幅多视差分干涉图，则第 m 幅 ($1 \leq m \leq M$) 差分干涉图上第 i 个像素 (x, y) 处的解缠相位可表示为 (Berardino 等, 2002)：

$$\begin{aligned} \delta\varphi^i &= \delta\varphi_{\text{def}}^i + \delta\varphi_{\text{topo}}^i + \delta\varphi_{\text{orbit}}^i + \delta\varphi_{\text{atm}}^i + \delta\varphi_{\text{noise}}^i + \delta\varphi_{\text{non}}^i \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d^i + \frac{4\pi B \perp}{\lambda R \sin \theta} \Delta H^i + \Delta\varphi_{\text{res}}^i \end{aligned} \quad (4)$$

式中， λ 表示雷达波长； Δd^i 表示第 i 个像素视线 LOS (Line of Sight) 向上的形变分量，称为低通 LP (Low-Pass) 形变分量； $\delta\varphi_{\text{topo}}^i$ 表示地形相位 $\delta\varphi_{\text{topo}}^i = \frac{4\pi B \perp}{\lambda R \sin \theta} \Delta H^i$ ； θ 和 $B \perp$ 分别表示雷达入射角和垂直基线的长度； R 表示相干目标与雷达卫星所在位置之间的距离； ΔH 是高程误差； $\delta\varphi_{\text{def}}^i$ 表示形变相位； $\delta\varphi_{\text{orbit}}^i$ 表示轨道误差； $\Delta\varphi_{\text{res}}^i$ 表示残余相位，主要包括大气延迟相位，噪声相位和高通 HP (High-Pass) 形变分量。当忽略地表水平移动时，InSAR 视线向形变值可表示为

$$\begin{aligned} \Delta d^i &= d_{\text{LOS}}(t_B^i) - d_{\text{LOS}}(t_A^i) = \\ & (W(x, y, t_B) - W(x, y, t_A)) \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $W(x, y, t_B)$ 和 $W(x, y, t_A)$ 分别为在 t_B 和 t_A 时刻的动态沉降量。将式 (5) 代入式 (4)，即可

得到 InSAR 差分干涉相位与概率积分预计参数之间的函数模型：

$$\begin{aligned} \delta\varphi^i &= \frac{4\pi}{\lambda} (W(x, y, t_B) - W(x, y, t_A)) \cdot \cos \theta + \\ & \frac{4\pi B \perp}{\lambda R \sin \theta} \Delta H^i + \Delta\varphi_{\text{res}}^i \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) 为基于 CT-PIM 的时序 InSAR 相位模型，其中矿区地质参数 $GP = [m, \alpha, H, D_1, \omega, v_m]$ 可根据矿区地质条件资料确定，视为已知数据。概率积分预计参数 $UP = [q, \tan\beta, s_1, s_2, k, n]$ 为待求参数。其中 q 的取值范围为 0.01—1； $\tan\beta$ 、 $\tan\beta_1$ 、 $\tan\beta_2$ 的取值范围均为 1—3.8； s_1 、 s_2 的取值范围均为 $0.05H$ — $0.3H$ ； $\theta_0 = 90^\circ - k\alpha$ ，其中 α 为矿层倾角， k 的取值范围为 0.5—0.8；启动距系数 n 的取值范围为 1/7—1/2 (Yang 等, 2016)。

式 (6) 中未知参数的求解是一个非线性参数估计的问题。对于生成的 M 个差分干涉图上任意一高相干点 (x, y) ，可列出 M 个方程。如果获取超过 6 景的 InSAR 差分干涉图，即可求解出未知参数。本文采用遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 与单纯形法 SM (Simplex Method) 相结合估计模型的未知参数 (肖宏峰和谭冠政, 2008; Yang 等, 2017b)。

2.3 基于 CT-PIM 模型的时序 InSAR 矿区形变预计

图 1 为基于 InSAR 相位观测值的 CT-PIM 模型数据处理流程，具体步骤如下：(1) 前期差分干涉处理：对获取覆盖研究区域的 $N + 1$ 景 SAR 影像进行 GAMMA 前期差分干涉处理生成差分干涉图、相干系数图和强度图。利用差分干涉图进行相位解缠生成相位矩阵，基于双重阈值法 (振幅离差指数和时域相干系数) 进行高相干点的选取。(2) 基于 CT-PIM 模型的时序 InSAR 建模。(3) 基于遗传算法和单纯形法搜索串行 GASM (Genetic Algorithm and Simplex Method) 的 CT-PIM 模型参数估计。(4) SAR 影像覆盖后期形变预计结果的生成：利用模型参数结果和 SAR 影像覆盖后期任意一时间序列，生成 SAR 影像覆盖后期矿区垂向时序形变预计结果。

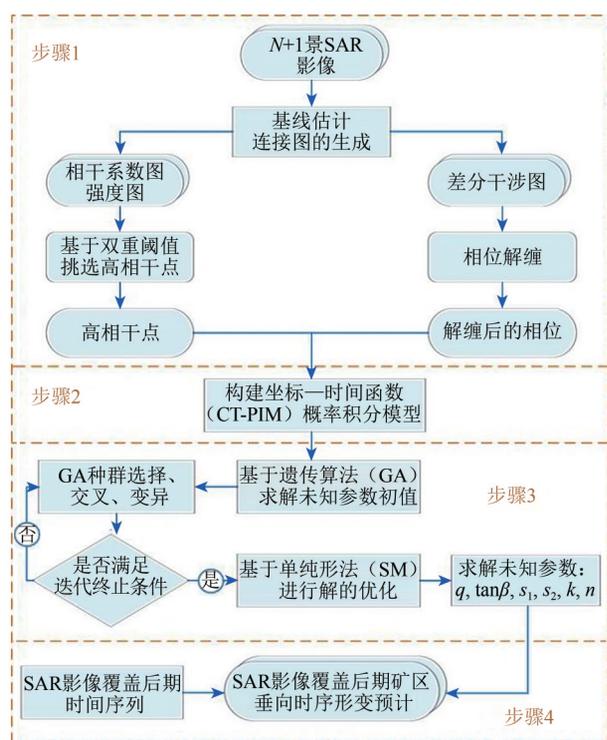


图1 基于CT-PIM的时序InSAR矿区形变预计流程图

Fig. 1 Flow chart of the InSAR deformation prediction based on CT-PIM

3 实验研究

3.1 模拟实验

为验证本文方法的可行性和可靠性,开展了模拟实验。模拟实验中采用的卫星参数依据真实实验中 Sentinel-1 A SAR 影像参数设定(具体见 3.2.1 节)。矿区地质参数 GP 根据真实矿区的实地调查资料进行设定: $GP = [3.0 \text{ m}、7.5^\circ、300 \text{ m}、200 \text{ m}、80^\circ、0.24 \text{ m/d}]$ 。设置待求的预计参数真值为 $UP = [0.604、3.120、30.310 \text{ m}、28.080 \text{ m}、0.524、0.169]$,代入式(1)生成真实的沉降序列。差分干涉图根据式(6)模拟生成,并分别加入 $0\text{--}0.65 \text{ rad}$ 的随机噪声相位。利用前述方法估计的预计参数如表 1 所示,并获取了 34 景形变序列。提取了形变序列中 500 个像素点进行定量的对比分析(图 2)。

图 2 为 500 个像素点在 0.65 rad 高噪声水平时,形变求解值与模拟真实沉降值对比图。很显然,即使在较大噪声的干扰下,本文方法生成的沉降结果与真实值仍保持了较好的一致性。从数据统计来看,图 2 (a)—(h) 中,误差分布在 $[-3 \text{ mm}$,

$3 \text{ mm}]$ 的高相干点分别占 100%、99.2%、98.4%、96%、94%、88%、86%、83%,其中的最大误差分别为 1.2 mm 、 2.5 mm 、 3.2 mm 、 3.9 mm 、 4.6 mm 、 8.2 mm 、 9.4 mm 和 10.2 mm 。图 2 (h) 中红色折线为 852 天时误差情况,最大误差仅占最大形变量的 7.7%。为定量评定 CT-PIM 模型求解参数值精度,分别计算出参数真实与计算值的相对误差(表 1),结果表明:6 个未知参数的相对误差均小于 6.5%,相对误差越小,求解参数值越接近于模拟真值。CT-PIM 模型生成的形变量与模拟沉降量的均方根误差为 $\pm 4.6 \text{ mm}$ 。

表 1 CT-PIM 模型参数求解值

Table 1 Estimated CT-PIM parameters

预计参数	真实值	计算值	误差	相对误差/%
q	0.604	0.626	0.022	3.6
$\tan\beta$	3.120	3.158	0.038	1.2
$s_1(\text{m})$	30.310	32.320	2.010	6.4
$s_2(\text{m})$	28.080	27.437	0.643	2.3
k	0.524	0.505	0.019	3.6
n	0.169	0.175	0.006	3.4

3.2 真实数据实验

3.2.1 测区数据及处理

真实实验选取淮安市西顺河镇某盐矿作为研究区域。图 3 为研究区域图及 SAR 卫星影像上的位置。图中红色矩形表示覆盖测区的 Sentinel-1 A (升轨) 数据的空间覆盖范围,紫色矩形为本文实验裁剪区域。研究区域岩盐矿产资源极为丰富,不仅储量大,而且含盐品味高,分布范围相对集中。

矿床属陆地湖相蒸发岩型沉积,分布范围较广,沉积韵律频繁,持续的矿产资源开发造成了地下岩层结构的改变,对周围环境及地质造成了巨大的破坏;部分沉降显著区域甚至出现地下卤水涌出,造成土地盐碱化,对周边环境造成了严重的破坏。通过对研究区域工作面上覆岩层岩性特征的调研和搜集到的矿区地质资料可知(朱培等, 2020; 李小明等, 2018),研究区域主要分布在淮安盐盆、洪泽盐盆两地,倾角 $5^\circ\text{--}9^\circ$,矿层顶板埋深约 $600\text{--}800 \text{ m}$,分别设定测区地质参数 $GP = [7.5^\circ、600 \text{ m}、5 \text{ m}、416.44 \text{ m}、80^\circ、0.056 \text{ m/d}]$ 。

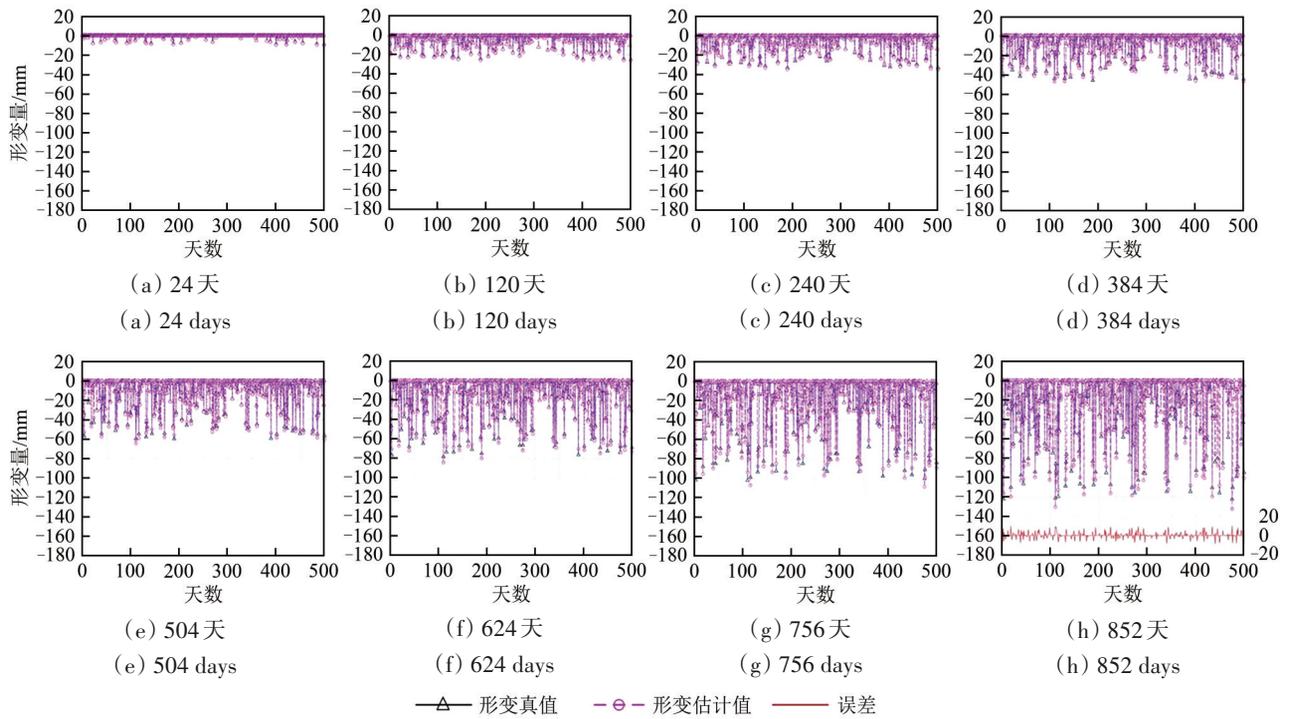
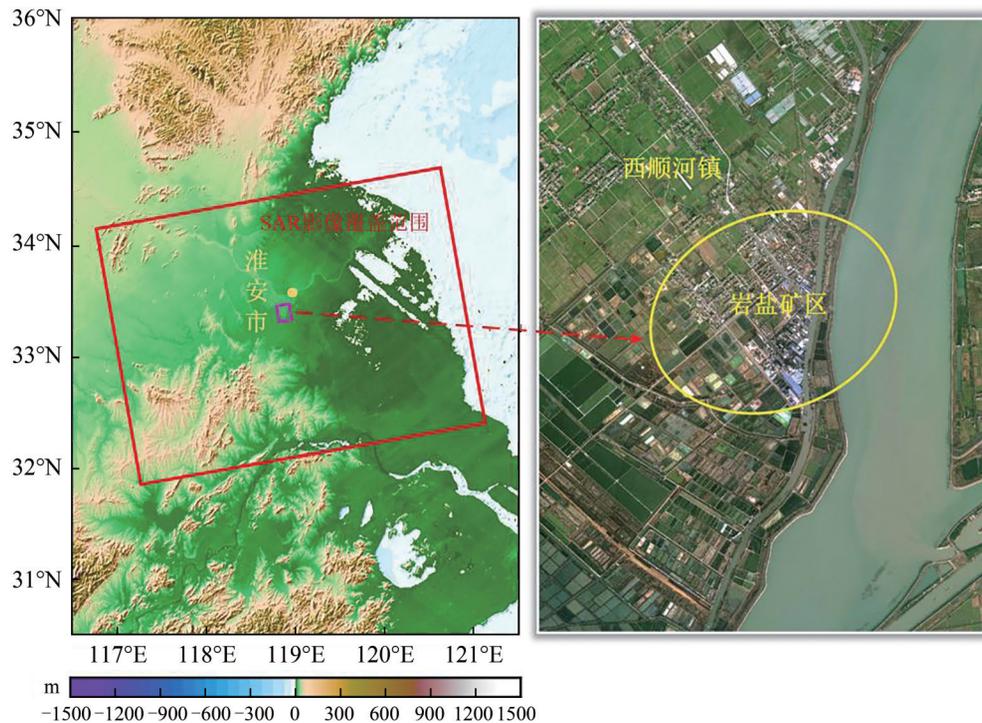


图2 CT-PIM模型形变求解值与模拟真实沉降值对比图

Fig. 2 Comparison between the CT-PIM generated deformation sequences and the simulated real settlement



(a) SAR影像覆盖范围
(a) Coverage of SAR images

(b) 研究区域卫星影像
(b) Satellite images of the study area

图3 研究区域图和SAR影像覆盖范围

Fig. 3 Study area and SAR spatial coverage

共收集2017年3月28日至2019年7月28日的35景覆盖研究区域的升轨Sentinel-1A SAR影像用

于前期差分干涉处理,影像的参数如表2所示,时空基线分布如图4所示。实验处理中,采用多项式

拟合方法去除轨道误差, 利用最小费用流 MCF (Minimum Cost Flow) 方法进行解缠处理, 共生成

56个解缠后的差分干涉图 (Li等, 2008), 提取了钻井水溶矿区 3269 个高相干点。

表 2 所用 SAR 影像的基本参数表

Table 2 Basic parameters of the used SAR acquisitions

编号	获取日期	时间基线/d	空间基线/m	编号	获取日期	时间基线/d	空间基线/m
0	2017-03-28	-360	-2.25	18	2018-06-27	96	8.92
1	2017-04-21	-336	-108.15	19	2018-07-21	120	-86.34
2	2017-05-15	-312	-97.49	20	2018-08-14	144	-13.71
3	2017-06-08	-288	-43.62	21	2018-09-07	168	-62.58
4	2017-07-02	-264	-42.06	22	2018-10-01	192	-68.64
5	2017-07-26	-240	-25.26	23	2018-10-25	216	53.06
6	2017-08-19	-216	-43.43	24	2018-11-18	240	-36.96
7	2017-09-12	-192	-97.56	25	2018-12-12	264	23.73
8	2017-10-06	-168	15.89	26	2019-01-05	288	75.43
9	2017-10-30	-144	-80.69	27	2019-02-10	324	-16.69
10	2017-11-23	-120	-64.14	28	2019-03-06	348	-53.46
11	2017-12-17	-96	70.59	29	2019-03-30	372	-91.37
12	2018-01-10	-72	-18.53	30	2019-04-23	396	-147.34
13	2018-02-27	-24	-15.03	31	2019-05-17	420	-15.52
14	2018-03-23	0	0	32	2019-06-10	444	-0.45
15	2018-04-16	24	-16.53	33	2019-07-04	468	12.01
16	2018-05-10	48	-114.97	34	2019-07-28	492	-72.68
17	2018-06-03	72	-19.87	18	2018-06-27	96	8.92

注: 黑体为主影像。

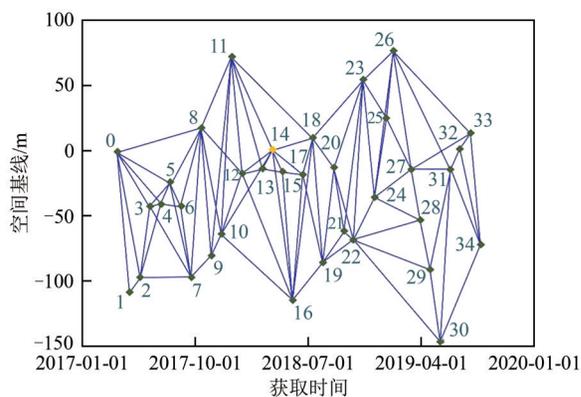


图 4 时空基线图

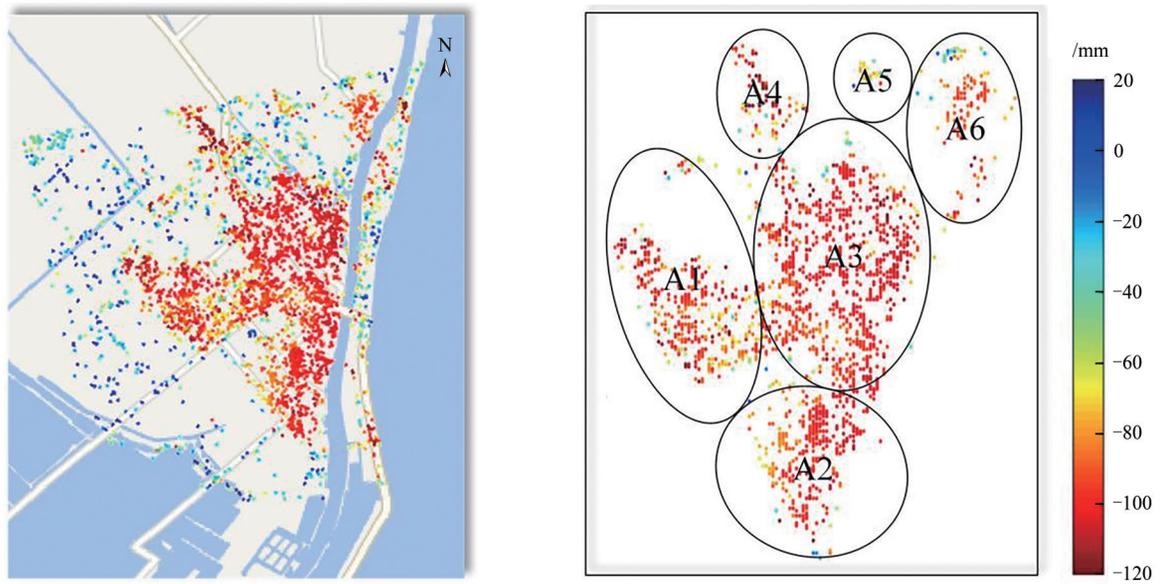
Fig. 4 Spatio-temporal baselines

3.2.2 实验结果

本文先利用 SBAS-InSAR 传统多速率模型开展了实验, 得到 2017 年 3 月 28 日至 2019 年 7 月 28 日期间的 34 个时序沉降结果, 实验发现, 截至 2019 年 7 月 28 日, 最大沉降为 146 mm, 由于盐矿区采用两井或多井连通方式开采, 在每个钻井周围都会形成沉降漏斗甚至连通的情况 (如图 5 (a) 所示)。

如果对整个测区采用一个 CT-PIM 模型, 很难对该研究区中复杂的沉降漏斗实际情况进行准确建模。在此, 将矿区划分为 6 个子沉降漏斗 (如图 5 (b) 所示), 分别对每个漏斗开展本文方法实验。实验处理中, 利用前 29 景影像 (2017 年 3 月 28 日至 2019 年 3 月 6 日) 开展 2.3 节中步骤 (2) — (3) 的形变监测过程, 获取的 CT-PIM 参数见表 3, 时序形变结果见图 6; 后 6 景影像 (2019 年 3 月 30 日至 2019 年 7 月 28 日) 用于开展步骤 (4) 的 SAR 影像覆盖后期形变的预计, 预计结果见图 7。

从图 6 可以看出, 从 2017 年 4 月 21 日至 2018 年 3 月 23 日期间, 整个测区由蓝色到浅绿色, 总体呈缓慢下沉趋势, 截至 2018 年 3 月 23 日, 最大沉降为 62 mm。在 2018 年 4 月 16 日至 2019 年 3 月 6 日期间, 随着矿区开采的进一步推进, 整个测区由浅黄色逐渐加剧变红, 到 2019 年 3 月 6 日, 开始出现大量级的沉降, 最大值达到 119 mm。由图 7 可知, 截至 2019 年 7 月 28 日, 随着矿区的持续开采而逐渐扩大, 累计最大预计沉降量达 152 mm。



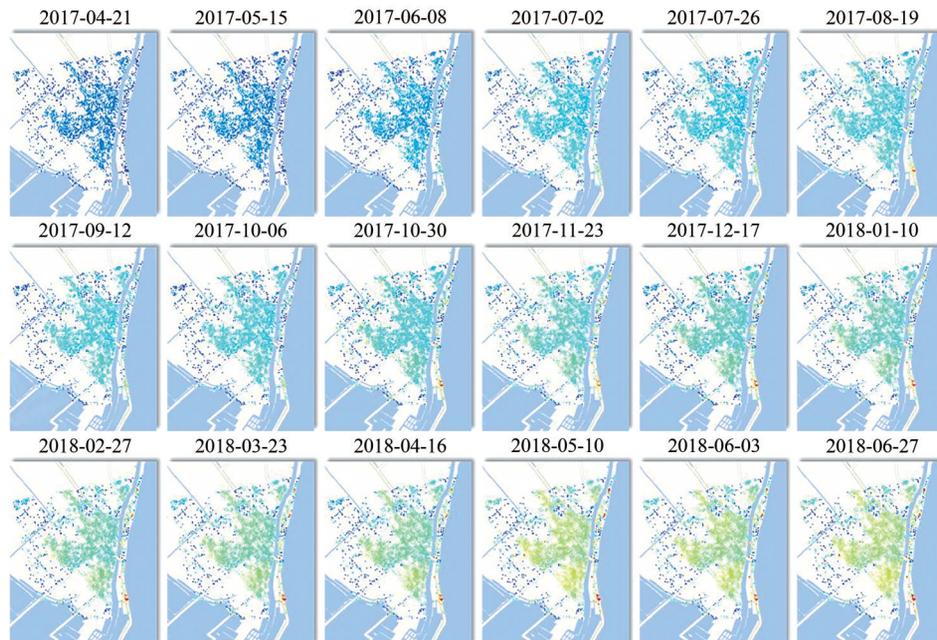
(a) SBAS-InSAR 获取的 2019 年 7 月 28 日沉降结果
 (a) Settlement results obtained by SBAS-InSAR on July 28, 2019
 (b) 6 个沉降漏斗分布区域
 (b) Distribution of the six sub-settlement funnels

图 5 沉降漏斗分布图

Fig. 5 Schematic map of sub-settlement funnels distribution.

表 3 CT-PIM 模型估计参数
 Table 3 Estimated CT-PIM parameters

参数	沉降漏斗					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
q	0.792	0.761	0.829	0.813	0.808	0.902
$\tan\beta$	3.385	3.116	3.325	3.575	3.318	3.125
s_1/m	79.169	40.170	56.132	50.172	60.170	53.166
s_2/m	46.481	56.480	48.233	56.479	46.398	66.312
k	0.568	0.517	0.677	0.667	0.619	0.576
n	0.160	0.166	0.233	0.215	0.213	0.251



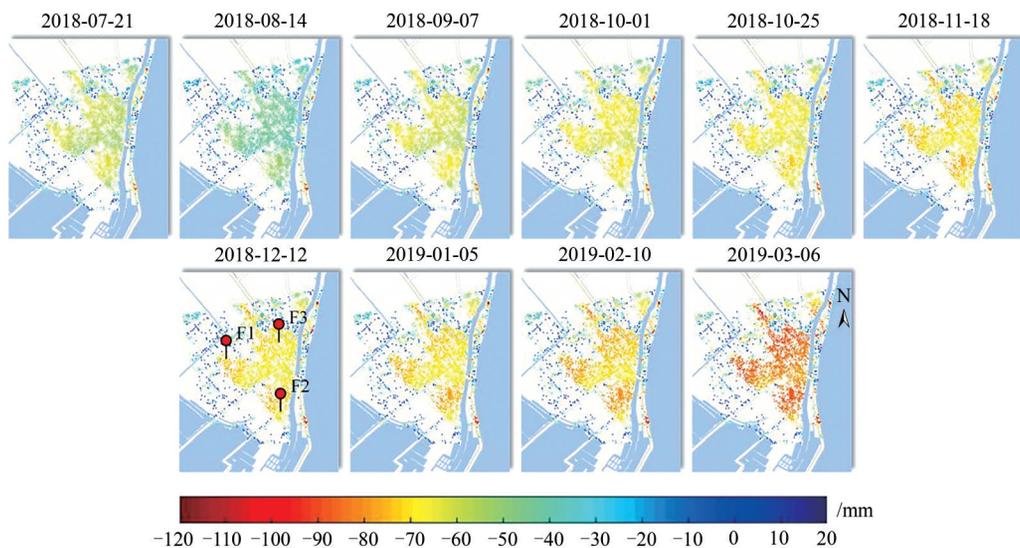
图6 时序形变监测结果(参考时间:2017年3月28日, F_1 — F_3 为特征点)

Fig. 6 Derived deformation sequences (Reference date: March 28, 2017)

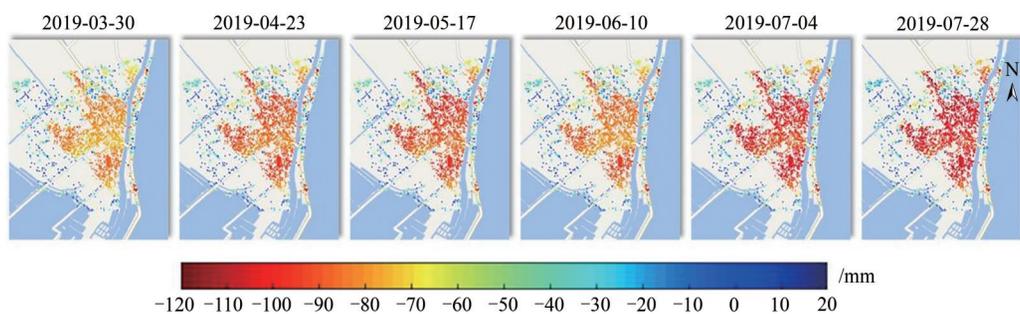


图7 CT-PIM模型获取时序形变预计结果(参考时间:2017年3月28日)

Fig. 7 Derived deformation prediction sequences based on CT-PIM (Reference date: March 28, 2017)

4 实验结果讨论

为了进一步分析本文获取的结果随时间变化的特征,选取3个特征点(F_1 — F_3 ,位置如图6所示)进行时序定量分析,结果如图8所示(虚线为SBAS-InSAR结果,实线为CT-PIM结果)。从图8中可以看出,2017年3月28日至2019年7月28日期间,3个特征点都表现出相似的时间变化趋势。SBAS-InSAR获取的形变序列呈现出线性变化趋势。CT-PIM模型获取的形变序列整体下沉且伴随着季节性变化。其中 F_3 的沉降速率最大,截至2019年7月28日,其累计下沉量达146 mm。而离钻井口较远的 F_1 点则相对稳定,最大形变量为72 mm。在暖季:第1阶段(2017年3月28日至2017年10月6日)、第2阶段(2018年3月23日至2018年10月1日)和第3阶段(2019年3月6日至2019年7月28日),特征点下沉速率相对较快,累计最大下沉分别为57 mm, 31 mm和27 mm。在冷

季,第1阶段(2017年10月6日至2018年3月23日)和第2阶段(2018年10月1日至2019年3月6日),沉降曲线则趋于平缓,累计下沉量为8 mm和12 mm。产生这一季节性波动原因主要是由于芒硝的溶解速率直接受溶剂温度的影响(表4)(Foumelis等,2016)。实验区域注入井中的淡水溶剂的温度约为40 °C,以保证芒硝达到最大溶解度。然而,溶剂温度容易受到外界空气温度的影响。在夏天,外界环境的高温使得溶剂的溶解度显著提升,加速了芒硝的溶解,进而引发地表快速下沉的现象;相反,冬季时由于外界温度的降低,溶剂的温度随之降低,抑制了芒硝的溶解度,进而使得矿区地表的形变较为缓慢。

从图8中还可以发现,CT-PIM获取的形变序列中,3个特征点均在相同的5个时段出现了微小隆起(黑色箭头所指向位置),这也与图6和图7中的时序沉降图颜色时序变化特征保持了一致。隆起现象除与上述冬季低温导致的溶剂溶解度降

低有关外，还与降雨量的增加有关 (Foumelis 等, 2016)。根据江苏省淮安市气象局的降水和气温数据

显示, 2017年7月2日至7月26日、2018年3月23日至4月16日、2018年7月21日至8月14日、2019年3月6日至3月30日和2019年5月17日至6月10日出现了降雨量的显著增加, 如图8所示。外部雨水的回灌加剧了这几个时段矿区地表形变的抬升现象。

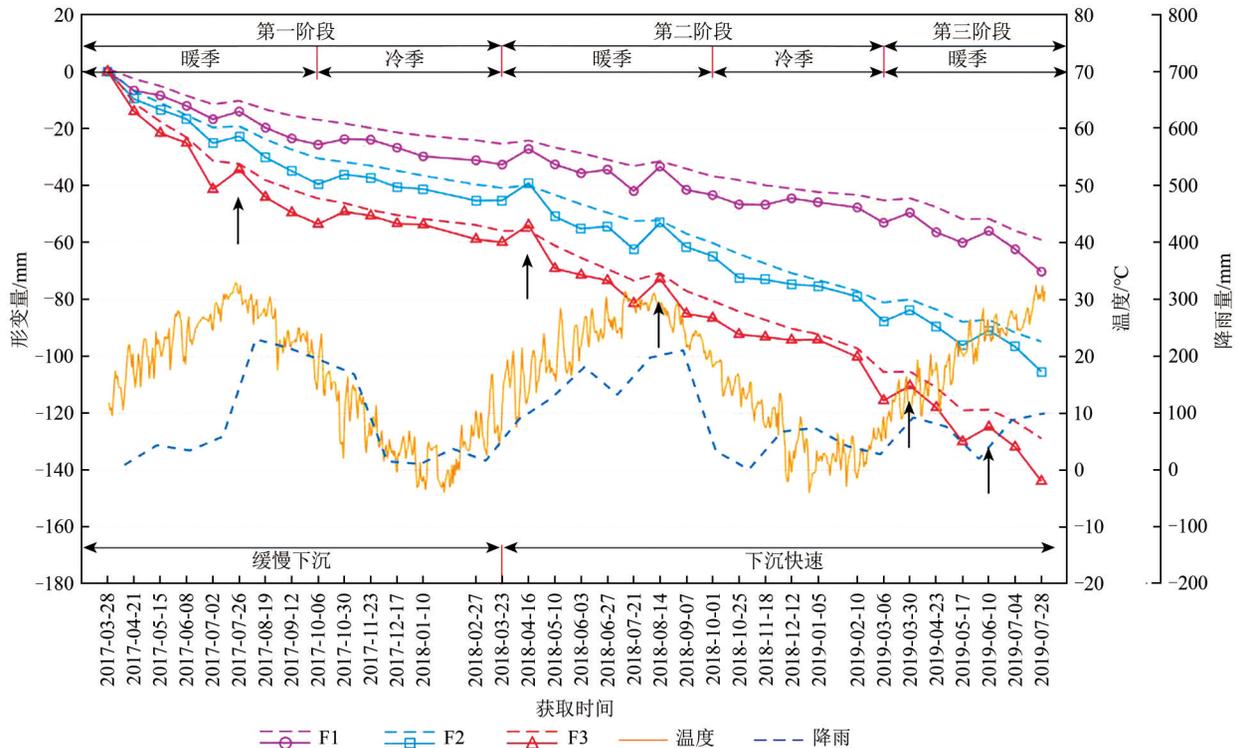


图8 特征点时间序列沉降(虚线为SBAS-InSAR结果,实线为CT-PIM结果)

Fig. 8 Time series settlement on feature points (The dotted line is the SBAS-InSAR result, the solid line is the CT-PIM result)

表4 不同温度下无水芒硝的溶解度

Table 4 Solubility of thenardite at different temperatures / (g/100 g 水)

温度/°C	矿物		
	无水芒硝	芒硝	钙芒硝
0	—	5.0	0.18
10	—	9.0	0.19
20	—	19.4	0.20
30	50.4	40.8	0.21
40	48.8	—	0.21
50	46.7	—	—
60	45.3	—	0.21
70	44.1	—	0.20
80	43.7	—	0.20
90	42.9	—	—
100	42.5	—	0.16

CT-PIM模型获取的形变序列与传统SBAS-InSAR对比图显示在图9中。从图9可以看出, 相

对传统SBAS-InSAR结果, CT-PIM模型获取的时序形变结果颜色变化趋势更为明显, 整体沉降量偏大并伴有季节性变化。从图8可以看出, CT-PIM模型获取结果揭示了形变时序变化的抬升现象: 2017年7月2日至7月26日、2018年3月23日至4月16日、2018年7月21日至8月14日、2019年3月6日至3月30日和2019年5月17日至6月10日, 而在SBAS-InSAR结果中几乎没有体现。从图9中也可以看出, 2019年3月6日至3月30日和2019年5月17日至6月10日两个抬升时段(如图9中箭头所示), CT-PIM模型结果有变淡趋势, 而SBAS-InSAR结果并不明显。通过定量分析可得, CT-PIM模型获取的5个时段抬升最大值分别为9.6 mm、7.4 mm、9.8 mm、6.9 mm和7.4 mm。与传统SBAS-InSAR相比, CT-PIM模型可更好地描述盐矿区形变随时间呈现的非线性演化特征, 辅助盐矿区形变物理解译。

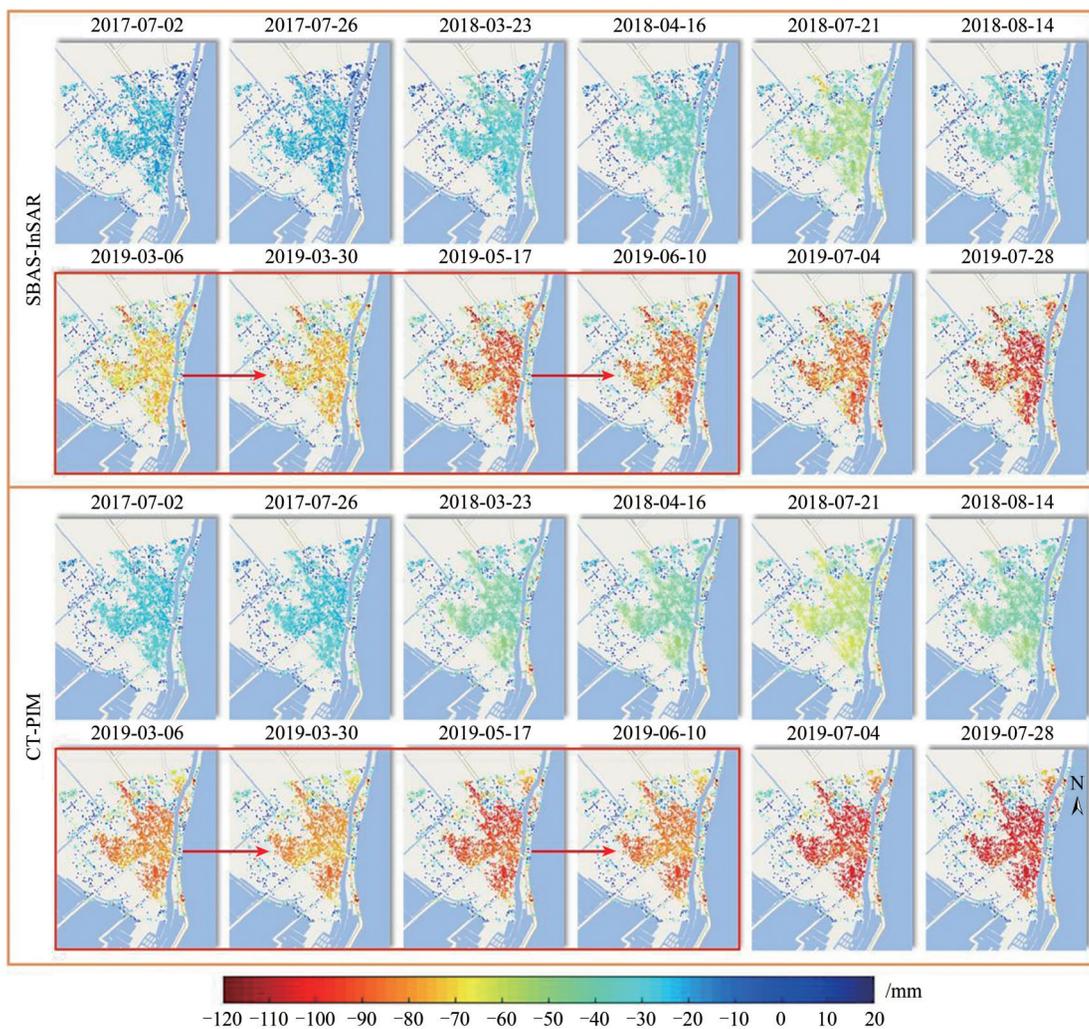


图9 CT-PIM获取的时序形变与SBAS-InSAR对比(参考时间:2017年3月28日)

Fig. 9 Comparison of time series deformation obtained by CT-PIM and SBAS-InSAR (Reference date: March 28, 2017)

5 敏感性分析

5.1 模型参数的敏感性

如Yang等(2018b)所述,PIM参数的估计精度直接影响着PIM模型预计获取的形变精度,即参数敏感性高时,即使这一参数出现较小的误差,预计形变也会产生较大扰动;对那些敏感性较低参数而言,即使模型参数估计的误差较大,对最终的形变精度影响也较弱。因此,本文利用模拟数据对CT-PIM模型进行敏感性分析,以分析哪些参数为敏感参数。共利用8组不确定的参数值作为输入数据开展实验,分别获取最终预计形变。表5列出了6个未知参数的模拟值和每个参数的误差对应的范围,模型的不确定度是根据函数 $\frac{X}{X_{\max}} \times 100\%$ 来定义。

表5 CT-PIM模型参数的不确定性

Table 5 Inaccuracy of the CT-PIM parameters

参数	参数模拟值	误差范围	偏差程度/%
q	0.5	0—1	-40—40
$\tan\beta$	2	1—3	-60—60
s_1	20 m	0—40 m	-100—100
s_2	20 m	0—40 m	-100—100
k	0.65	0.5—0.8	-70—70
n	0.35	0.2—0.5	-60—60

图10显示了由于模型参数不同程度的偏差导致形变估计误差情况。从图10中可以看出,下沉系数 q 和影响角正切值 $\tan\beta$ 的敏感性最高,对形变结果影响占主导作用。左点偏移距 s_1 和右点偏移距 s_2 的敏感性相对较低。因此,准确估计下沉系数 q 和影响角正切值 $\tan\beta$ 对于后续准矿区形变序列的预计至关重要。

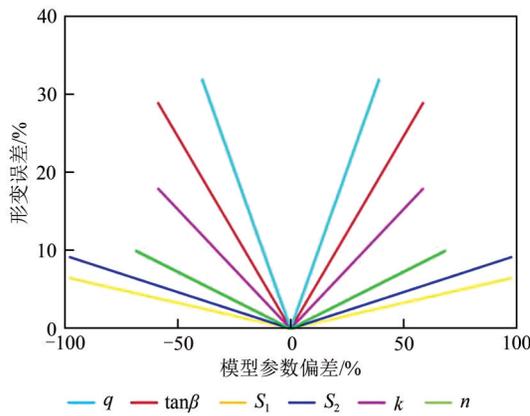


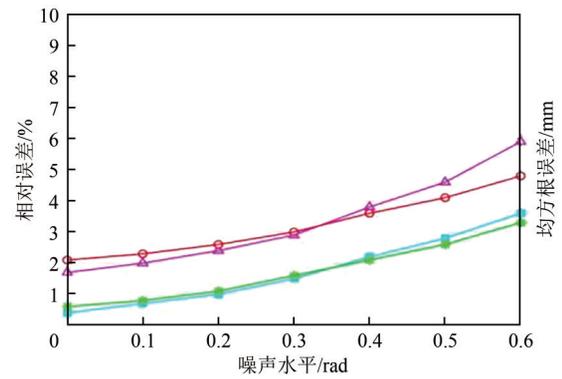
图10 模型参数敏感性分析结果

Fig. 10 Sensitivity analysis results of model parameters

5.2 模型误差传递分析

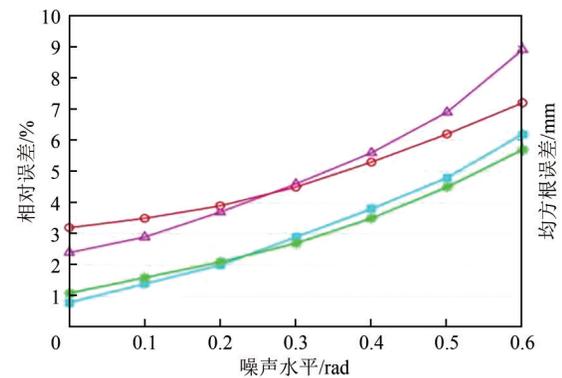
为进一步分析本文方法误差传递特性，分别开展两组误差传递模拟实验：(1) 利用2.2节中介绍的式(6)，对等号左侧观测相位加入不同程度噪声，再计算估计的CT-PIM参数，分析对应生成预计的形变序列误差变化特征；(2) 利用加入不同程度噪声的相位，用传统SBAS方法生成形变序列，再结合形变序列估计静态概率积分(Static-PIM)参数，分析对应生成预计形变序列误差变化特征。由敏感性分析结果可知，下沉系数 q 和影响角正切 $\tan\beta$ 敏感性较高，因此，分别探究在不同干扰噪声相位下概率积分预计参数 q 和 $\tan\beta$ 误差对于后期形变预计精度的影响。

图11分别显示了CT-PIM模型和传统静态概率积分(Static-PIM)模型在不同相位噪声水平下 q 和 $\tan\beta$ 误差引起的预计形变 $W(q, t)$ 和 $W(\tan\beta, t)$ 的均方根误差。从图中可以看出，随着噪声水平的增大，参数 q 和 $\tan\beta$ 的相对误差逐渐增大，所引起预计形变的均方根误差也随之增大。图11(a)中CT-PIM模型的误差水平整体低于图11(b)中(Static-PIM)模型。在0.6 rad高噪声水平影响下，CT-PIM模型参数求解值与模拟真值的相对误差均小于6%，所引起的预计形变值与模拟真实形变值的均方根误差均小于3.6 mm；而传统(Static-PIM)模型在相位有较小变化(0.3 rad相位噪声水平)时，就会引起参数相对误差的较大变化，进而导致预计形变结果产生6.2 mm的均方根误差。从而证实了本文方法利用相位直接估计CT-PIM参数，并将模型直接用于形变的预计，可有效减弱误差的传递。



(a) CT-PIM模型

(a) CT-PIM model



(b) Static-PIM模型

(b) Static-PIM model

— q — $W(q, t)$ — $\tan\beta$ — $W(\tan\beta, t)$

图11 不同噪声水平下参数的相对误差和预计形变结果的均方根误差

Fig. 11 Relative errors of parameters and RMSE of deformation prediction under different noise levels

6 精度验证

6.1 形变监测结果的精度分析

由于研究区域没有可用的外部水准数据，通过查阅已有文献，本实验获取的最大年平均沉降速率51 mm/a与已有对淮安盐矿区形变监测结果保持良好的一致性(夏斯雨等, 2018)，证实了本文获取的形变预计结果量级的准确性。为弥补无外部可用水准数据的局限，根据Xing等(2023)精度评定方法开展内部精度评定。根据间接平差理论，未知参数的协因数 $\hat{\sigma}_{\hat{x}_i}^2$ 可衡量未知参数的估计精度。由误差传播定律可知，观测值的误差由式(6)传递至模型的未知参数后，进而引起形变的误差。通过计算形变的中误差 σ 衡量内部精度，精度评定结果见表6。根据表6可知，6个沉降漏斗观测值单位权方差 $\hat{\sigma}_0^2$ 均小于9.2 mm²，未知参数的协因

数 $\hat{\sigma}_{\hat{x}_i}^2$ 均小于 2.5。通过计算 6 个沉降漏斗的累积形变的中误差可知, 漏斗 A4 的形变中误差最大, 为 ± 3.019 mm, 6 个漏斗的平均中误差为 ± 2.41 mm,

占最大形变的 1.5%, 从而表明模型具有较高的内部精度。

表 6 精度评定结果

Table 6 Accuracy evaluation results

指标	沉降漏斗					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
$\hat{\sigma}_0^2$	2.328	8.925	6.235	9.116	6.607	3.548
$\hat{\sigma}_q^2$	0.016	0.029	0.022	0.031	0.019	0.025
$\hat{\sigma}_{\tan\beta}^2$	0.043	0.032	0.057	0.039	0.047	0.033
$\hat{\sigma}_{s_1}^2/\text{m}^2$	2.033	2.251	1.026	1.156	1.432	1.166
$\hat{\sigma}_{s_2}^2/\text{m}^2$	1.079	2.322	1.213	1.023	1.398	2.312
$\hat{\sigma}_k^2$	0.018	0.027	0.013	0.017	0.021	0.036
$\hat{\sigma}_n^2$	0.005	0.003	0.006	0.011	0.009	0.013
σ/mm	1.525	2.987	2.496	3.019	2.570	1.883

根据 Zhao 等 (2016) 所述, 残余相位的大小可以较好地反应 InSAR 建模监测结果与真实形变的拟合程度, 即可衡量模型的建模精度。干涉对中残余相位越小, 表示建模精度越高。残余相位可以通过式 (6) 中的差分干涉相位与低通形变相位分量进行相减获得。分别对选取的 38 个差分干涉对中所有高相干点的残余相位进行标准差 STD (Standard Deviation) 计算, 再与多速率模型结果

进行对比, 结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 两种模型的残余相位均小于 0.9 rad, CT-PIM 残余相位均小于 0.65 rad。SBAS-InSAR 多速率模型的 STD 为 0.56 rad, 而 CT-PIM 模型的 STD 为 0.38 rad, 相比提升了 38.2%。对比分析结果可知, InSAR-CTPIM 模型的残余相位明显小于多速率模型, 说明 CT-PIM 在建模盐矿的形变过程中具有更好的精度。

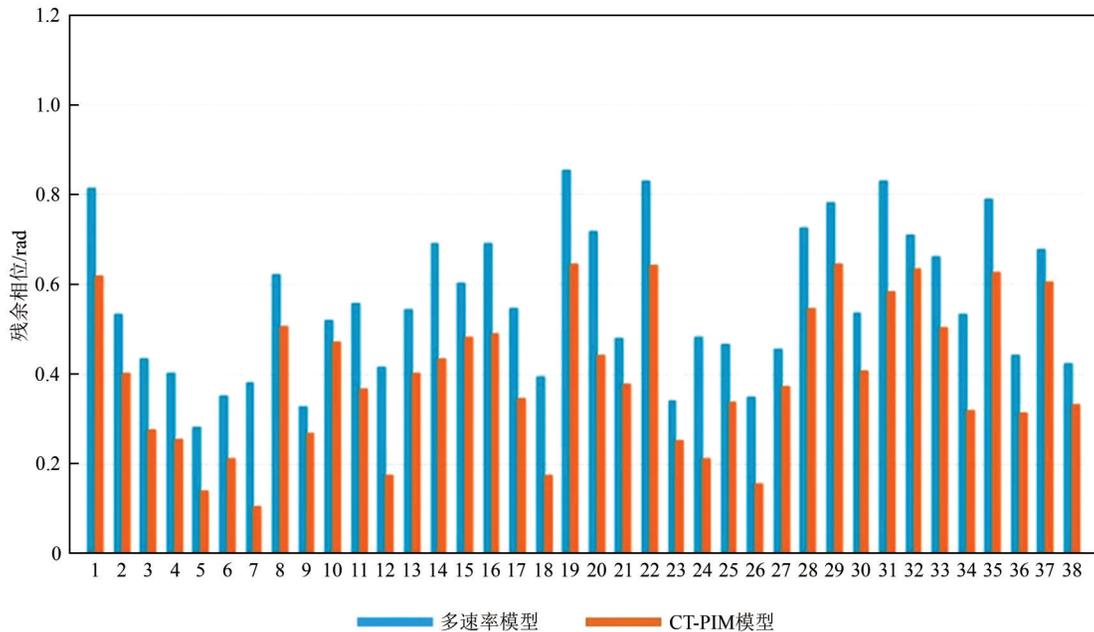


图 12 各干涉图的残余相位对比

Fig. 12 Residual phase comparison of each interferogram

6.2 CT-PIM模型形变预计精度分析

如3.2.1节所述,保留了2019年3月30日至2019年7月28日的6景影像用于验证CT-PIM模型对SAR影像覆盖范围后期形变的预计。在此将传统静态概率积分(Static-PIM)的预计方法获取矿区形变预计结果与CT-PIM模型的形变预计结果分别和SBAS-InSAR获取的沉降结果进行对比。提取

形变预计的4个时期(分别为2017年3月28日至2019年3月30日、2019年5月17日、2019年6月10日和2019年7月28日)进行分析(如图13所示)。从图中可以看出(以A1和A3漏斗为例),CT-PIM模型结果与SBAS-InSAR结果保持一致;而Static-PIM与SBAS-InSAR形变监测结果差异较大。

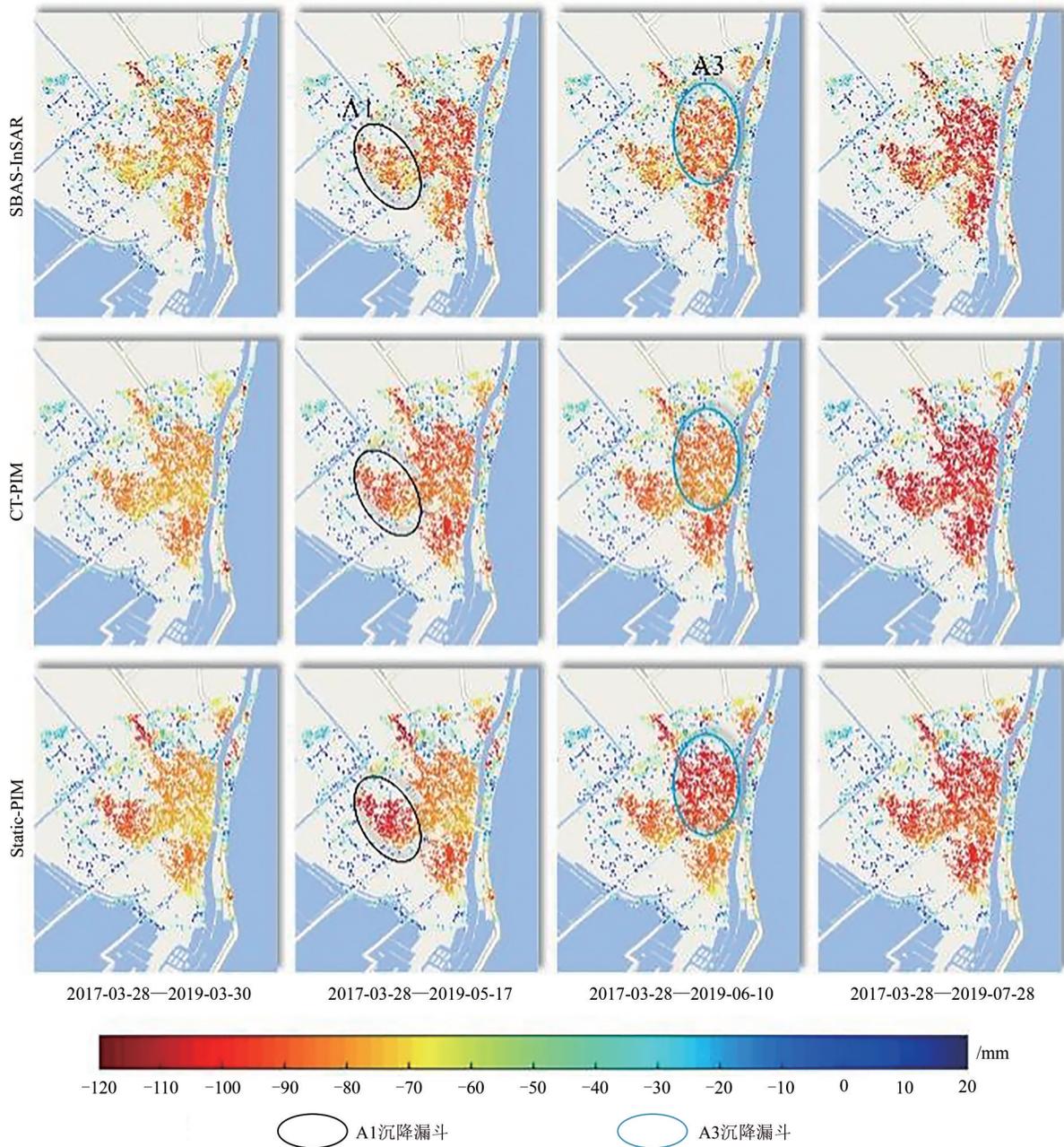


图13 形变预计对比(参考时间:2017-03-28)

Fig. 13 Deformation prediction comparison (Reference date: March 28, 2017)

为进一步定量分析,分别对图13的4个时期的形变预计结果与SBAS-InSAR监测结果的形变量

偏差进行计算,并对其概率分布进行统计(结果如图14、图15所示)。从图14可以看出,CT-PIM

模型的形变预计结果在4个时期与SBAS-InSAR的监测结果之间的形变量偏差主要分布在 $[-20\text{ mm}, 20\text{ mm}]$ 范围。形变量的最大偏差为 19.6 mm ；Static-PIM模型的形变量偏差(图15所示)主要分布在 $[-30\text{ mm}, 30\text{ mm}]$ 范围内，形变量的最大偏

差为 28.9 mm 。显然，CT-PIM模型的误差分布比Static-PIM更集中，总STD为 $\pm 8.4\text{ mm}$ ，而Static-PIM结果总STD为 $\pm 12.6\text{ mm}$ 。CT-PIM模型形变预计结果比传统Static-PIM模型提高 39.1% 。

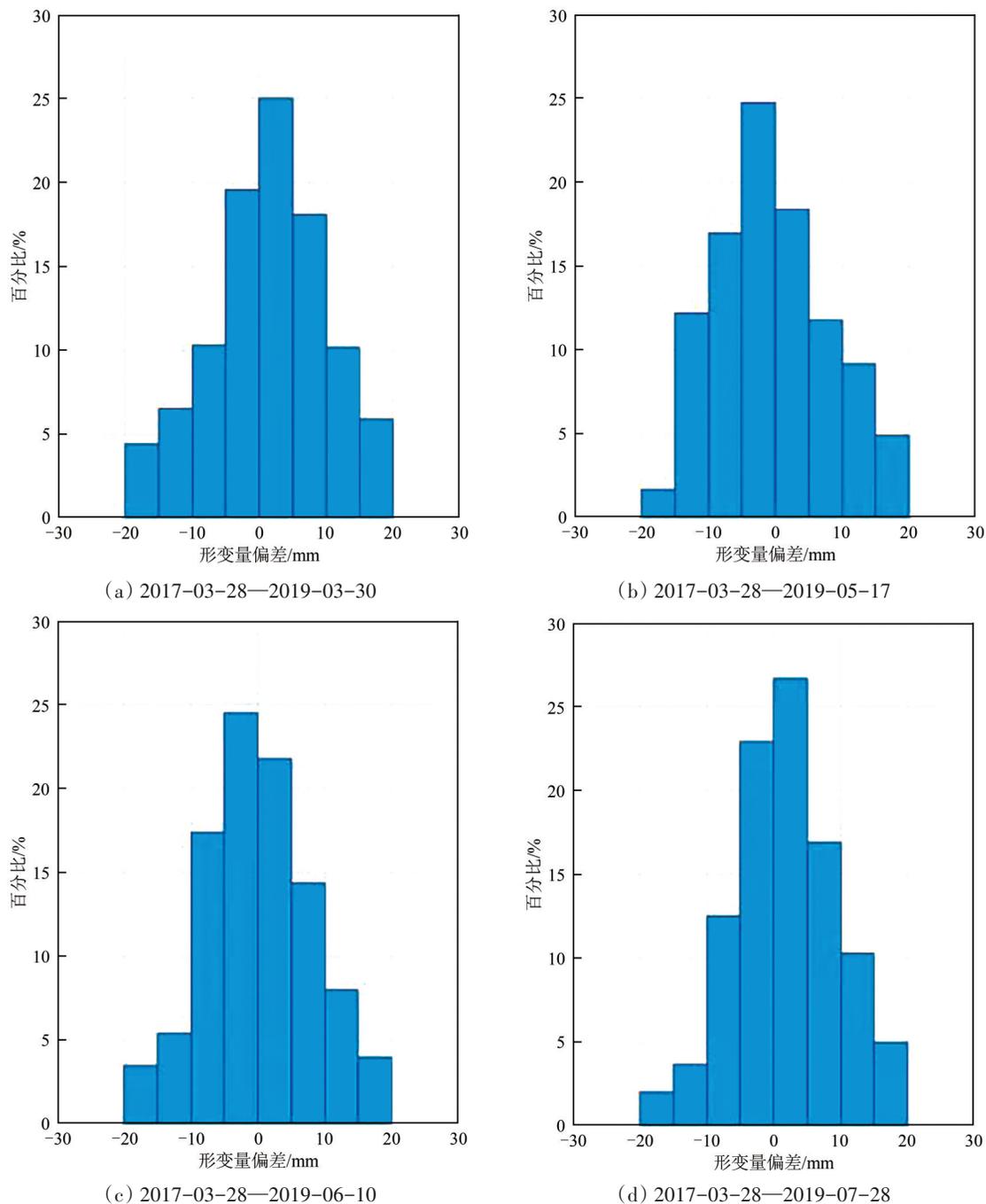


图14 CT-PIM模型形变预计结果与SBAS-InSAR的形变量偏差(参考时间:2017年3月28日)

Fig. 14 Differences of CT-PIM predicted subsidence with comparison of SBAS-InSAR (Reference date: March 28, 2017)

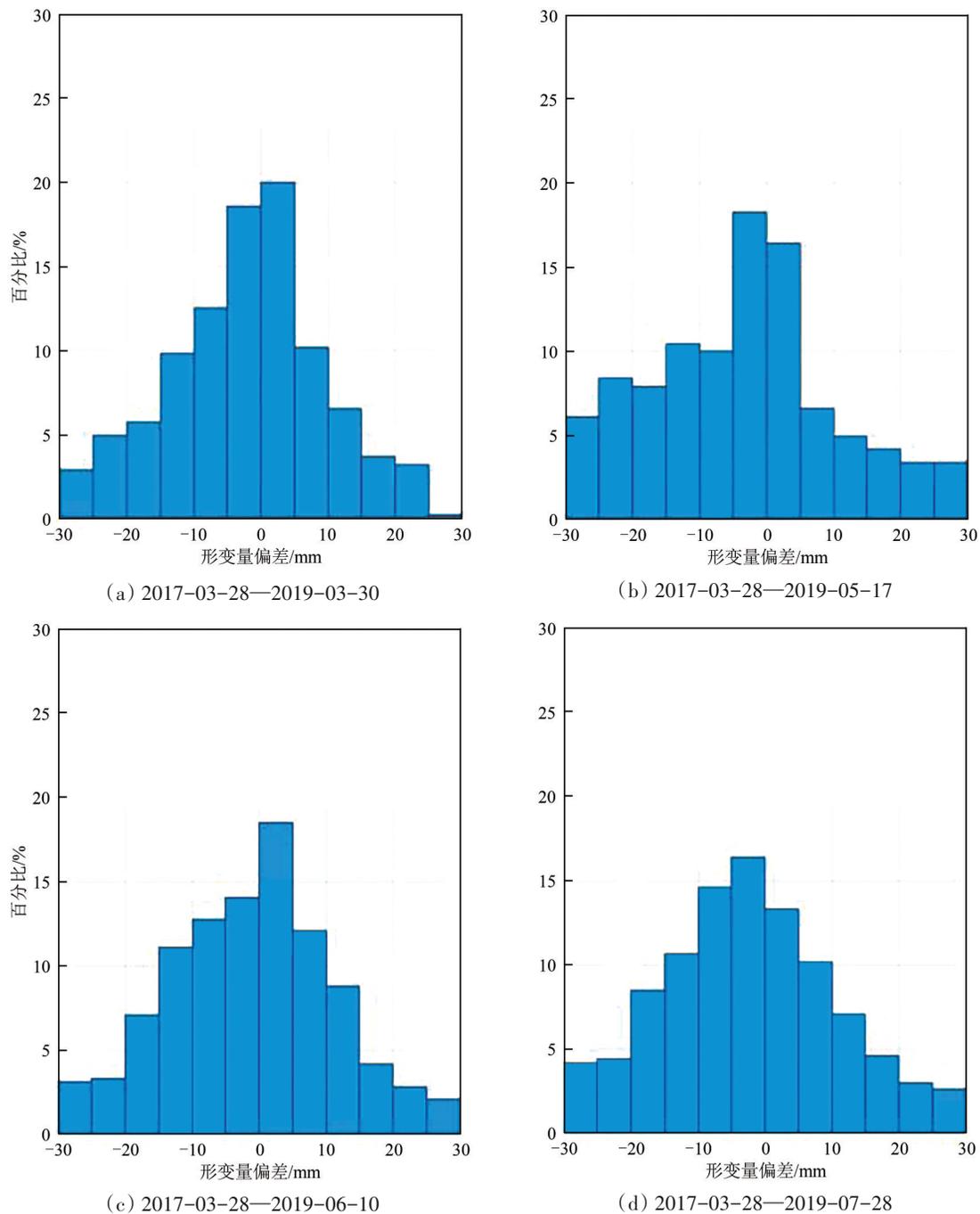


图15 Static-PIM 模型形变预计结果与SBAS-InSAR的形变量偏差(参考时间:2017年3月28日)

Fig. 15 Differences of Static-PIM predicted subsidence with comparison of SBAS-InSAR (Reference date: March 28, 2017)

7 结 论

本文将坐标—时间函数CT (Coordinate Time) 引入时序InSAR建模环节, 提出了基于CT-PIM预计模型的矿区时序InSAR预计方法, 并将其应用于淮安盐矿区地表时序形变预计。研究表明:(1) 测区最大沉降量达152 mm, 在时间序列上, 盐矿区形变伴随有显著的季节性波动, 这一特征

与芒硝矿床溶剂随温度的溶解速率有关。(2) 本文方法基于InSAR观测相位直接估计CT-PIM模型预计参数, 避免了利用SBAS方法生成形变序列观测值再反演预计参数过程中的误差二次传递, 提高了形变预计的精度;(3) CT-PIM模型可直接应用于SAR影像覆盖范围后期形变的预计, 弥补了传统InSAR形变模型与后期预计模型不一致性的理论缺陷。

为验证本文方法可靠性,开展了与传统SBAS-InSAR多速率模型和传统静态概率积分预计方法的对比。结果表明,本文方法构建的CT-PIM模型建模精度提升了38.2%,形变预计精度提升了39.1%。

本文方法没有考虑水溶开采中溶液的溶解特性对地表形变的影响,后续研究中将开展顾及溶液浓度和扩散系数等物理参数的时序InSAR建模研究。

志 谢 感谢欧洲航天局 (ESA) 提供的 Sentinel-1A 卫星影像。

参考文献 (References)

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]
- Chen Y, Tong Y X and Tan K. 2020. Coal mining deformation monitoring using SBAS-InSAR and offset tracking: a case study of Yu County, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 6077-6087 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3028083]
- Fan H D, Lu L and Yao Y H. 2018. Method combining probability integration model and a small baseline subset for time series monitoring of mining subsidence. *Remote Sensing*, 10(9): 1444 [DOI: 10.3390/rs10091444]
- Foumelis M, Papageorgiou E and Stamatopoulos C. 2016. Episodic ground deformation signals in Thessaly Plain (Greece) revealed by data mining of SAR interferometry time series. *International Journal of Remote Sensing*, 37(16): 3696-3711 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1201233]
- Gama F F, Cantone A, Mura J C, Pasquali P, Paradella W R, Dos Santos A R and Silva G G. 2017. Monitoring subsidence of open pit iron mines at Carajás Province based on SBAS interferometric technique using TerraSAR-X data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8: 199-211 [DOI: 10.1016/j.rsase.2017.09.001]
- Li X M, Jiang Q Q, Zhu W Q, Liu Z C, Wu J F and Zhu P. 2018. Analysis on the ledge comparison and the distribution characteristics of the salt mine on the Zhaoji mining area, Hongze Sag. *China Well and Rock Salt*, 49(5): 16-19 (李小明, 姜芹芹, 朱卫琴, 刘兆成, 吴进飞, 朱培. 2018. 洪泽凹陷赵集矿区盐矿分布特征及矿层对比分析. *中国井矿盐*, 49(5): 16-19) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0335.2018.05.006]
- Li Z W, Ding X L, Zheng D W and Huang C. 2008. Least squares-based filter for remote sensing image noise reduction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(7): 2044-2049. [DOI: 10.1109/TGRS.2008.916981]
- Xia S Y, Lu F F and Yan W B. 2018. Research on ground subsidence monitoring Huaian based on SBAS-InSAR. *Modern Surveying and Mapping*, 41(6): 13-15 (夏斯雨, 陆藩藩, 晏王波. 2018. 基于 SBAS-InSAR 的淮安市地面沉降监测研究. *现代测绘*, 41(6): 13-15) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4097.2018.06.004]
- Xiao H F and Tan G Z. 2008. Study on fusing simplex search into genetic algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 44(18): 30-33 (肖宏峰, 谭冠政. 2008. 单纯形搜索在遗传算法中的融合研究. *计算机工程与应用*, 44(18): 30-33) [DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.18.009]
- Xiao L, He Y G, Xing X M, Wen D B, Tong C G, Chen L F and Yu X Y. 2019. Time series subsidence analysis of drilling solution mining rock salt mines based on Sentinel-1 data and SBAS-InSAR technique. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(3): 501-513 (肖亮, 贺跃光, 邢学敏, 闻德保, 童成功, 陈立福, 俞晓莹. 2019. Sentinel-1 和 SBAS-InSAR 分析钻井水溶岩盐矿山时序沉降. *遥感学报*, 23(3): 501-513) [DOI: 10.11834/jrs.20198292]
- Xing X M, Huang L, He Z M, Zhang T F, Zhu Y K. 2023. Health observation of the capital airport south expressway based on improved MT-InSAR technology. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 4(3): 232-241. [DOI: 10.1109/JMASS.2023.3260098]
- Xing X M, Zhu Y K, Yuan Z H, Xiao L, Liu X B, Chen L F, Xia Q and Liu B. 2021. Predicting mining-induced dynamic deformations for drilling solution rock salt mine based on probability integral method and Weibull temporal function. *International Journal of Remote Sensing*, 42(2): 639-671 [DOI: 10.1080/01431161.2020.1813345]
- Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, Feng G C, Wang Q J, Hu J and Wang C C. 2018a. Deriving time-series three-dimensional displacements of mining areas from a single-geometry InSAR dataset. *Journal of Geodesy*, 92(5): 529-544 [DOI: 10.1007/s00190-017-1079-x]
- Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, Hu J, Wang Y J and Chen G L. 2016. InSAR-based model parameter estimation of probability integral method and its application for predicting mining-induced horizontal and vertical displacements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8): 4818-4832 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2551779]
- Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, Preusse A, Hu J, Feng G C, Wang Y J and Papst M. 2018b. An InSAR-based temporal probability integral method and its application for predicting mining-induced dynamic deformations and assessing progressive damage to surface buildings. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(2): 472-484 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2789341]
- Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, Preusse A, Yi H W, Wang Y J and Papst M. 2017a. An extension of the InSAR-based probability integral method and its application for predicting 3-D mining-induced displacements under different extraction conditions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7): 3835-3845 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2682192]
- Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, Yi H W, Hu J and Feng G C. 2017b. Deriving dynamic subsidence of coal mining areas using InSAR and logistic model. *Remote Sensing*, 9(2): 125 [DOI: 10.3390/rs9020125]
- Zhang G M, Wang Z S, Wang L J, Chen Y L, Wu Y, Ma D and Zhang K. 2019. Mechanism of collapse sinkholes induced by solution mining of salt formations and measures for prediction and preven-

- tion. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(3): 1401-1415 [DOI: 10.1007/s10064-017-1173-6]
- Zhao R, Li Z W, Feng G C, Wang Q J and Hu J. 2016. Monitoring surface deformation over permafrost with an improved SBAS-InSAR algorithm: with emphasis on climatic factors modeling. *Remote Sensing of Environment*, 184: 276-287 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.019]
- Zhu G Y, Shen H X and Wang L G. 2011. Study of dynamic prediction function of surface movement and deformation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(9): 1889-1895 (朱广轶, 沈红霞, 王立国. 2011. 地表动态移动变形预测函数研究. *岩石力学与工程学报*, 30(9): 1889-1895)
- Zhu P, Liu Z C and Zheng Y. 2020. Analysis on structural configurations and influence factors of the dissolved salt cavity with solution mining in Huaian. *China Well and Rock Salt*, 51(5): 6-9 (朱培, 刘兆成, 郑瑜. 2020. 淮安地区岩盐水溶开采溶腔形态及其影响因素浅析. *中国井矿盐*, 51(5): 6-9) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0335.2020.05.003]

Incorporation of Coordinate–Time Function (CT–PIM) time–series InSAR deformation prediction for salt mining areas: Case study of the Huaian Salt Mine

ZHANG Tengfei, XING Xuemin, PENG Wei, ZHU Jun, LIU Xiangbin,
GE Jiawang, LEI Minchao

1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Institute of Radar Remote Sensing Applications for Traffic Surveying and Mapping, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

Abstract: Long-term monitoring and the subsequential prediction of deformation for salt mining areas is essential to the safety prevention and environmental protection of mining areas. The combination of the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique with the Probability Integral Method (PIM) has proven to be powerful in predicting the deformation of mining areas. However, single multitemporal InSAR (MT-InSAR) is limited because it can only obtain the deformation sequences during SAR acquisition dates, and the subsequent future displacement beyond the span of the SAR observations cannot be acquired. In addition, traditional mathematical empirical models are mostly used in the time-series modeling of mining areas, ignoring the underground mining mechanisms, which seriously affect the accuracy of the observations. Inaccurate InSAR deformation monitoring results transmit errors to forward predicted subsidence, which may induce considerable errors.

In this study, the Coordinate-Time (CT) function is introduced into time-series InSAR deformation modeling, and a CT function prediction model (CT-PIM), which can well describe the dynamic evolution disciplines of the underground mining subsidence in InSAR deformation modeling, is constructed to replace the traditional mathematical empirical models. The unknown CT-PIM parameters can be estimated directly via InSAR time-series phase observations, and the constructed CT-PIM is directly used in the deformation prediction of the mining area, which can avoid the error propagation from the InSAR-generated deformations and improve deformation prediction accuracy.

The new approach is tested by simulation and real data experiments. The simulation results show that the root mean square error between the time-series deformation prediction of the model and the simulated true value is estimated to be ± 4.6 mm, which implies that the proposed method is of promising accuracy. The real experiment was conducted using a total of 35 Sentinel-1A SAR images covering the salt mining area in Huaian City, and the deformation prediction results of the study area from March 30, 2019 to July 28, 2019 were obtained. Results show that the maximum settlement of deformation prediction in the study area is 152 mm. The modeling accuracy showed an improvement of 38.2% compared with traditional SBAS-InSAR, and the deformation prediction accuracy exhibited an improvement of 39.1% compared with the traditional static PIM prediction method.

CT-PIM was used as a substitute for traditional MT-InSAR pure empirical models and was applied for predicting the dynamic deformation over the salt mining area, which provides a more robust tool for the forecasting of mining-induced hazards. The above results show that CT-PIM can describe the temporal dynamic characteristics of the mining-induced subsidence more realistically, which can avoid the secondary error propagation, and can serve as a reference for safety management and ensuring environment protection.

Key words: remote sensing, InSAR, mine, Coordinate—Time Function, land subsidence, deformation prediction

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42074033, 51878078, 41701536, 41904003, 61701047); Hunan Natural Science Foundation Youth Fund (No. 2017JJ3322, 2019JJ50639, 2020JJ5571); Key Project of Education Department of Hunan Province (No. 18A148, 19C0042), Open Project Program of the Hunan Key Laboratory of Remote Sensing of Ecological Environment in Dongting Lake Area (No. 2021-011); Scientific Research Project of the Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., LET (No. 2023060); Changsha Innovation Talent Promotion Plan Project for Distinguished Young Scholar (No. kq2209011)