



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403089

引用格式:沙永莲,张焜,李宗仁,等. 涩北气田地表沉降时空演化特征及储层参数反演[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(9): 3584-3592.

Sha Yonglian, Zhang Kun, Li Zongren, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of land surface subsidence and reservoir parameters inversion in Sebei gas fields[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3584-3592.

涩北气田地表沉降时空演化特征及储层参数反演

沙永莲^{1,2,3}, 张焜^{1,2,3}, 李宗仁^{1,2,3*}, 王雅婷⁴, 祁慧君^{1,2,3}, 张娜^{1,2,3}

(1. 青海省地质调查院, 西宁 810012; 2. 青海省遥感大数据工程技术研究中心, 西宁 810012;
3. 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 西宁 810012; 4. 31668 部队, 西宁 810012)

摘要 对气田区进行沉降监测及储层参数反演可为气田安全生产防护、开采规划提供重要支撑信息。以涩北气田区为研究对象,利用 SBAS-InSAR 方法调查了其于 2022 年 2 月—2023 年 9 月期间的地表沉降演化特征,进一步以 InSAR 监测结果为观测量,通过长椭球模型反演了气田储层中心投影坐标、深度、走向等参数信息。结果表明,涩北气田区中台南气田、涩北 1 号、2 号气田均出现沉降漏斗,年均沉降速率分别为 $-124 \sim -109$ 、 $-275 \sim -34$ 、 $-329 \sim -89$ mm/a,其中,涩北 1 号、2 号气田表现出更为显著的地表沉降现象,而且 3 个气田区地表均在持续快速下沉;进一步以 InSAR 监测结果为观测量反演得到储层参数,结果显示,利用储层参数正演所得形变与观测形变差异较小,空间分布较为一致,表明基于 SBAS-InSAR 形变结果反演涩北气田储层参数具有一定的可靠性。

关键词 涩北气田; SBAS-InSAR; 地表沉降; 参数反演

中图法分类号 P642 TP79; 文献标志码 A

Spatial-temporal Evolution Characteristics of Land Surface Subsidence and Reservoir Parameters Inversion in Sebei Gas Fields

SHA Yong-lian^{1,2,3}, ZHANG Kun^{1,2,3}, LI Zong-ren^{1,2,3*}, WANG Ya-ting⁴,
QI Hui-jun^{1,2,3}, ZHANG Na^{1,2,3}

(1. Institute of Geological Survey of Qinghai Province, Xining 810012, China;
2. Qinghai Remote Sensing Big Data Engineering Technology Research Center, Xining 810012, China;
3. The Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources Laboratory, Xining 810012, China;
4. 31668 Troops, Xining 810012, China)

[Abstract] Subsidence monitoring and reservoir parameters inversion in gas field can provide important supporting information for safe production protection and mining planning. The SBAS-InSAR method was used to investigate the surface subsidence evolution characteristics of Sebei gas fields from February 2022 to September 2023. Furthermore, the InSAR monitoring results were used as the observation measurements to invert the reservoir center projection coordinates, depth, strike and other parameters of the gas fields through the Prolate spheroid source. The results show that the subsidence funnel occurs in the Tainan gas field, the Sebei No. 1 gas field and the Sebei No. 2 gas field, and the average annual subsidence rate is $-124 \sim -109$, $-275 \sim -34$, and $-329 \sim -89$ mm/a, respectively. Among them, the Sebei No. 1 gas field and the Sebei No. 2 gas field show a more significant surface subsidence phenomenon. And the surface of all three gas fields continues to sink rapidly. Further, the reservoir parameters were obtained by inversion of InSAR monitoring results. The results show that there is little difference between the deformation derived by using the optimal parameters and the observed deformation, and the spatial distribution is consistent, which indicates that it is feasible to invert the reservoir parameters of Sebei gas fields based on SBAS-InSAR deformation results.

[Keywords] Sebei gas fields; SBAS-InSAR; surface subsidence; parameters inversion

涩北气田是中国陆上大气区之一,约占青海气田区已探明储量的 90%,是保障青藏高原居民用气需求的主要供气基地^[1-2]。而气田长期持续性开采会

导致地表层破坏、地下压力减弱等,从而引发地表沉降,严重时会对地表建筑及地下设备安全性产生威胁。因此,定期监测气田区地表稳定性并根据监

收稿日期: 2024-04-26 修订日期: 2024-12-15

基金项目: 青海省地矿局计划(2024-24-4)

第一作者: 沙永莲(1994—),女,汉族,青海西宁人,硕士,工程师。研究方向:合成孔径雷达干涉测量与应用。E-mail:973281310@qq.com。

* 通信作者: 李宗仁(1987—),男,汉族,青海民和人,硕士,高级工程师。研究方向:资源与环境遥感应用。E-mail:303523234@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

测结果采取防治措施是十分必要的。当前,合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术具有全天候、覆盖范围广、空间分辨率高等优势,完全满足气田区地表周期性监测要求,对提取气田区大范围区域性形变具有独特优势,其中,小基线集(small baseline subset, SBAS) InSAR 技术利用多个干涉对进行干涉相位建模,可以有效抑制形变提取过程中的误差项,从而获取毫米级精度的地表形变信息,目前也得到了广泛应用。陈志谋等^[3]利用 SBAS-InSAR 技术对国内某油田开采时引起的地表沉降进行监测,综合分析其地表形变速率、范围以及地面形变影响因素。张静等^[4]采用 SBAS-InSAR 技术对地面沉降监测数据进行时序分析,发现累积沉降量和沉降区范围均随着时间不断增大,且地面沉降与地下水开采、油气资源开采、新构造运动等多种因素具有密切关系。龚志强等^[5]通过将相干性信息作为权重融入 SBAS-InSAR 技术获取了辽河三角洲地区 2017—2020 年地表形变信息。

此外,气田的区域性沉降是储层压强变化、形状变化等在地表的直观体现,反映出地下储层结构发生了一定变化,以遥感监测所得地表形变为约束,利用非线性反演方法,结合相关模型反演气田储层参数,有利于快速掌握地下储层结构,也可为获取开采量信息及下一步开采计划提供参考。自 2001 年 Xu 等^[6]使用 InSAR 技术对加利福尼亚州南部 Lost Hills 油田进行监测,并证明了 InSAR 监测油田形变进而计算油气产量的可行性后,这方面的研究逐渐受到关注,国内研究起步较晚,近几年才有越来越多的学者研究油气田储层反演。张东晓^[7]对新疆克拉玛依油田区采用 Mogi 点源模型和 Okada 位错模型分析了油气田区域性形变和油气注采活动的相关性。李春进等^[8]以曙光采油厂为研究对象,使用双椭球模型和双 Okada 模型对油田的储层参数反演展开研究,并对比分析两种双源模型反演结果的可靠性。龚志强等^[5]对曙光采油厂使用储层压实沉降模型进行反演,表明该模型能较好地反演油田沉降中心最大沉降量位置。Davis^[9]在 1988 年提出长椭球模型,是对原本用于火山反演的 Mogi 点源模型的拓展,更有利于解释地下流体变化导致的地表形变,因此,现以涩北气田为研究区,使用可获取毫米级精度的 SBAS-InSAR 方法,提取地表形变作为反演观测数据,基于非线性贝叶斯反演方法,使用长椭球模型进行气田储层参数的反演,快速获取了涩北气田储层结构相关参数,为涩北气田储层结构的快速掌握提供一定参考意义。

1 研究区域及数据源

1.1 研究区概况

涩北气田包括涩北 1 号、2 号和台南气田,位于青海省柴达木盆地,由东向西分布于东台吉乃尔盐湖南部,北部为 G315 国道,其地理位置如图 1 所示,研究区海拔 2 600 ~ 2 830 m。根据已有资料显示,涩北气田所在区域为高原干旱荒漠,主要为盐碱地,年均气温 3.56 °C,年降水量 30.24 mm,储层岩石以泥质粉砂岩为主,其中,台南气田构造平缓,气藏埋深 800 ~ 2 000 m^[10-11]。

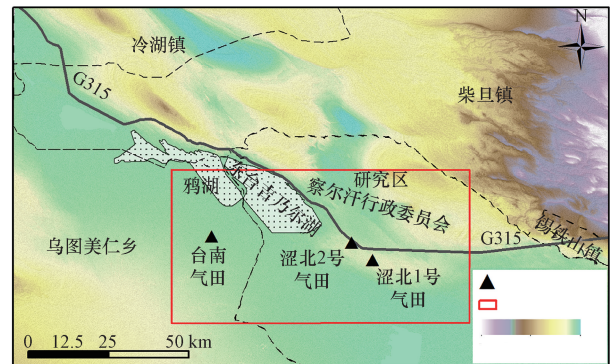


图 1 研究区地理位置及地貌特征图

Fig. 1 Map of geographical location and geomorphic characteristics of the study area

1.2 数据源

选取 25 景 Sentinel-1A 降轨 SAR 数据对研究区域进行 SBAS-InSAR 形变监测分析,影像获取时间为 2022 年 2 月 18 日—2023 年 9 月 17 日,每月至少一景影像。经过裁剪后监测区域面积约为 3 543.00 km², SAR 影像空间分辨率约为 13.95 m (方位向) × 2.33 m (距离向),入射角为 33.74°。在干涉处理过程中使用精密轨道数据进行轨道校正,使用高级陆地观测卫星(advanced land observation satellite, ALOS) 12.5 m 数字高程模型(digital elevation model, DEM)去除地形相位,并对干涉图进行地理编码。

2 涩北气田形变场提取及分析

2.1 SBAS-InSAR 处理方法

SBAS-InSAR 方法通过组合多主影像形成的干涉对,基于短时空基线准则,一般利用最小二乘法计算地表时序形变和平均速率^[12-13]。在一定程度上有效克服了传统差分干涉测量技术(differential InSAR, DInSAR)、基于单主影像的时序 InSAR 方法中易出现时空失相干的缺陷^[14]。该方法利用覆盖同一区域的 $N + 1$ 幅 SAR 影像,通过设置合适的时空

基线阈值组成不同的干涉对,并进行差分干涉处理,干涉图中某像元干涉相位^[15-16]可表示为

$$\delta\varphi_j = \varphi(t_B) - \varphi(t_A) \approx \delta\varphi_j^{\text{def}} + \delta\varphi_j^{\text{topo}} + \delta\varphi_j^{\text{atm}} + \delta\varphi_j^{\text{noise}} \quad (1)$$

式(1)中: $\delta\varphi_j$ 为像元干涉相位; $\varphi(t_A)$ 、 $\varphi(t_B)$ 为 t_A 和 t_B 时刻的相位; $\delta\varphi_j^{\text{def}}$ 为视线向地表形变; $\delta\varphi_j^{\text{topo}}$ 为地形相位; $\delta\varphi_j^{\text{atm}}$ 为大气相位; $\delta\varphi_j^{\text{noise}}$ 为噪声相位。通过奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)求解所得干涉图集合,从而获得整个观测期间的地表时间序列形变信息,具体流程如图2所示。在SAR数据处理过程中,临界垂直基线和时间基线分别是130 m和110 d,共组成干涉对66个,图3展示了所有干涉图基线组合情况。

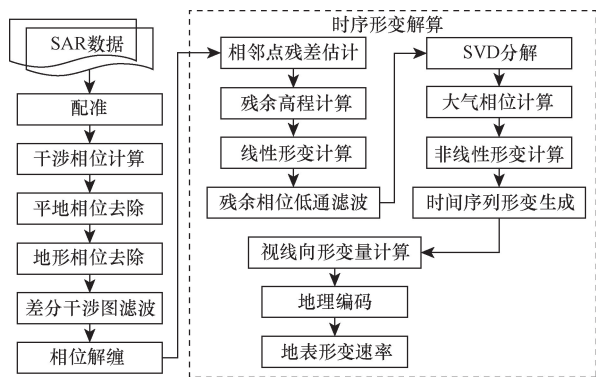


图2 SBAS-InSAR方法流程图
Fig. 2 Flow chart of the SBAS-InSAR method

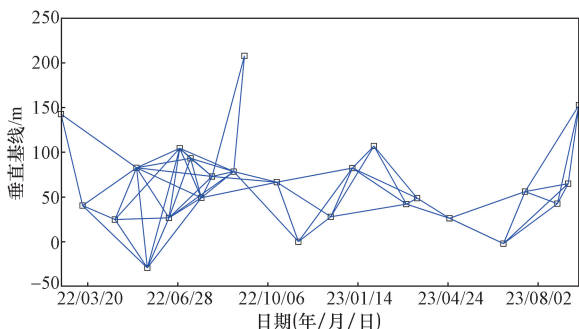


图3 SBAS-InSAR时空基线组合图
Fig. 3 The spatial-temporal baseline combination of SBAS-InSAR

2.2 形变结果分析

由于SAR卫星测视成像,利用SBAS-InSAR测量得到的是沿卫星视线方向(light of sight, LOS)的地表形变。考虑到这里的变形主要表现在垂直向上,为更好地体现气田区变形特征,根据雷达波入射角将LOS向形变转换至垂直向,正值表示抬升,负值表示沉降。图4展示了研究区地表沉降现状,整体来看,涩北气田区地表沉降分布不均匀,台南气田、涩北1号、2号气田区出现明显的沉降区域,并

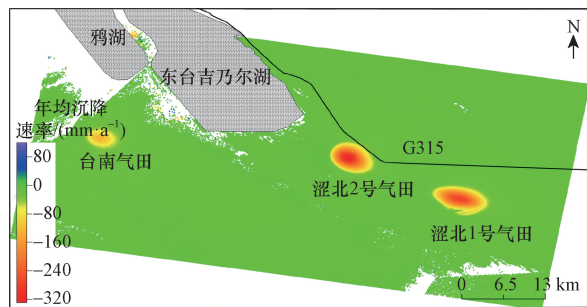


图4 基于SBAS-InSAR的涩北气田年均沉降速率
Fig. 4 Annual average subsidence rate of Sebei gas fields from SBAS-InSAR

且涩北1号、2号气田地表沉降相对严重,其他区域地表稳定性较好,这也说明气田开采可能是造成这些区域出现快速沉降的主要原因。

2.2.1 台南气田

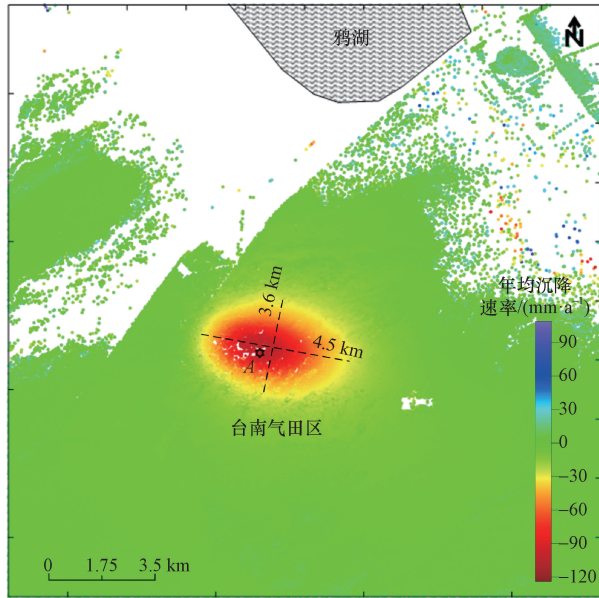
图5(a)展示了利用SBAS-InSAR测量的台南气田区在2022年2月18日—2023年9月17日期间的年均沉降速率结果,整体年均沉降速率为-124 ~ -109 mm/a。从监测结果来看,台南气田开采区呈现出一个明显的沉降漏斗,即从沉降区边缘至中心A(93.78°E, 37.38°N)沉降速率逐渐增加,整个沉降区表现为中心速率大、边缘速率小的“漏斗”状,沉降区东西向约4.50 km,南北向约3.60 km,面积约为13.69 km²,且沉降中心A紧邻地表建筑[图5(b)],200.00 m范围内分布有多处建筑,最近的建筑区仅70.00 m,地表沉降会对建筑安全产生一定的威胁。

为进一步了解台南气田在这段时间的地表沉降演化特征,提取沉降中心A点100 m半径内的特征点沉降时间序列结果[图5(c)],发现2022年2月18日—2023年9月17日期间该区域呈现持续性快速沉降,整体呈线性形变趋势,累计沉降量超过150 mm,该区域地表沉降情况需持续关注。

2.2.2 涩北1号气田

涩北1号气田区年均沉降速率结果如图6(a)所示,整体年均沉降速率为-275 ~ -34 mm/a。从监测结果来看,涩北1号气田区同样呈现出沉降漏斗,沉降区东西向约8.20 km,南北向约5.10 km,沉降区面积约为30.35 km²,沉降中心B(94.30°E, 37.30°N)2.00 km范围内有多处地表建筑群[图6(b)],地表快速沉降会对建筑安全产生一定的威胁。

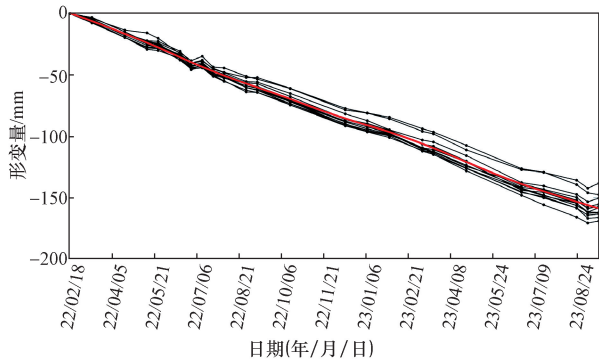
提取沉降漏斗中心B处100 m范围内的特征点时序曲线,如图6(c)所示,2022年2月18日—2023年9月17日期间涩北1号气田开采区地表沉降严重,从图6中红色拟合曲线趋势可以看出,该区域



(a) 年均沉降速率图



(b) 沉降区建筑分布情况



(c) 特征点时序曲线(红色曲线为拟合曲线)

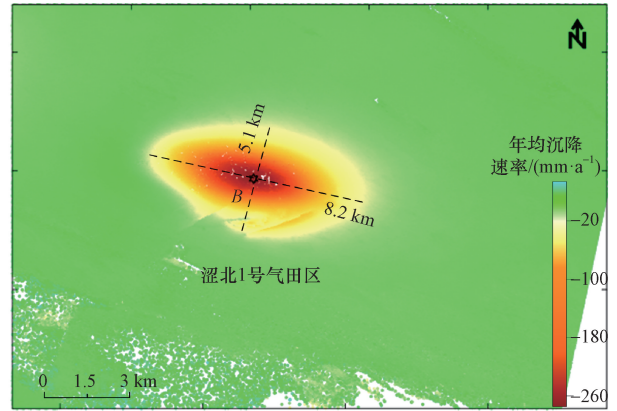
图5 基于SBAS-InSAR的台南气田地表沉降及沉降区建筑分布情况

Fig. 5 Surface subsidence of Tainan gas field based on SBAS-InSAR and distribution of buildings

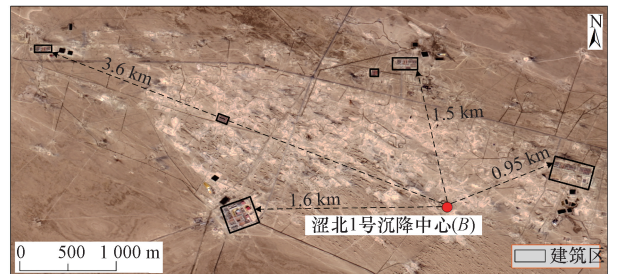
呈明显线性形变趋势且在持续性快速沉降, 累计沉降量超过 400 mm, 该区域地表沉降现象需要重点关注。

2.2.3 涩北2号气田

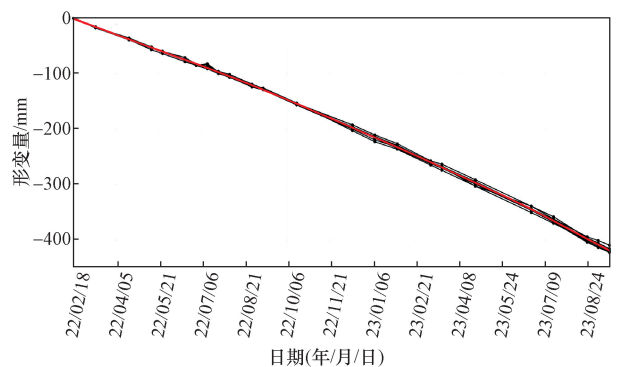
涩北2号气田区年均沉降速率结果如图7(a)所示, 整体年均沉降速率为 -329 ~ -89 mm/a。涩



(a) 年均沉降速率图



(b) 沉降区建筑分布情况

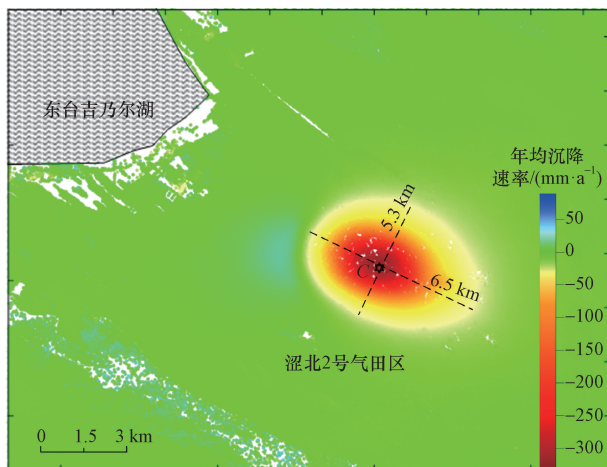


(c) 特征点时序曲线(红色曲线为拟合曲线)

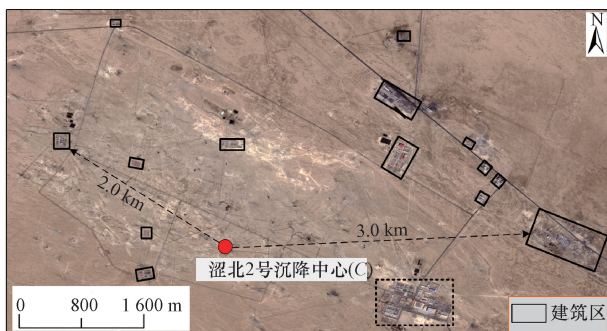
图6 基于SBAS-InSAR的涩北1号气田地表沉降及沉降区建筑分布情况

Fig. 6 Surface subsidence of Sebei No. 1 gas field based on SBAS-InSAR and distribution of buildings

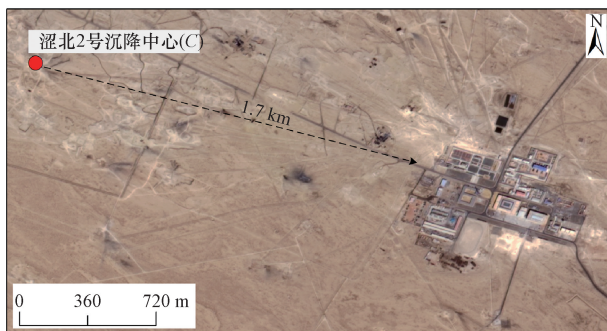
北2号气田沉降漏斗东西向约 6.50 km, 南北向约 5.30 km, 沉降区面积约为 25.81 km²。提取沉降漏斗中心 C(94.14°E, 37.36°N) 处 100 m 范围内的特征点时序曲线, 如图 7(d) 所示, 2022 年 2 月 18 日—2023 年 9 月 17 日期间涩北 2 号气田区累计沉降量超过 500 mm, 地表沉降严重, 图 7 中红色拟合曲线表明该区域呈明显线性形变趋势且在持续性快速沉降。沉降漏斗中心 C 处 3.00 km 范围内有多处地表建筑[图 7(b)], 东南方 1.70 km 处是一较大的生活区[图 7(c)]。沉降区内有大量建筑生活区, 在如此快速持续的沉降下, 会造成一定的安全隐患, 需持续关注该区域地表稳定性。



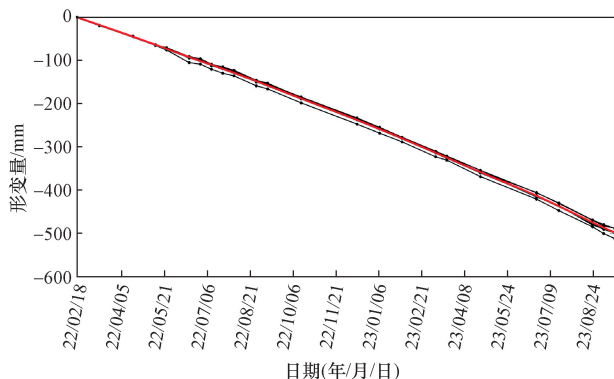
(a) 年均沉降速率图



(b) 沉降区建筑分布情况



(c) 图(b)虚线建筑区处放大图



(d) 特征点时序曲线(红色曲线为拟合曲线)

图7 基于 SBAS-InSAR 的涩北 2 号气田地表沉降及沉降区建筑分布情况
Fig. 7 Surface subsidence of Sebei No. 2 gas field based on SBAS-InSAR and distribution of buildings

3 涩北气田储层参数反演

3.1 反演模型及方法

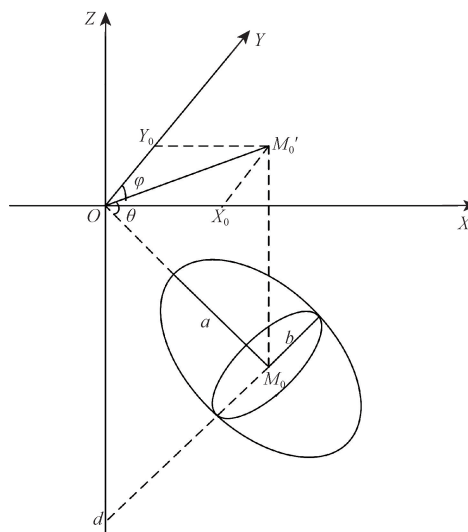
Davis^[9] 在 1988 年对弹性半空间有限维数内任意向的长球形腔体模型的解析计算式进行了推演计算,并提出了长椭球模型。相较于 4 参数组成的 Mogi 点源模型(点源中心三维坐标和点源球形半径),该模型由 8 参数组成(表 1),进一步拓展了 Mogi 点源模型的适用性,其中,走向 φ 为 $0^\circ/360^\circ$ 时表示北方向, 90° 为东向, 180° 为南向, 270° 为西向; 倾角 θ 为 0° 表示水平向, 90° 为垂向^[17]。模型示意图如图 8 所示。

基于长椭球模型,根据模型观测数据要求,以 SBAS-InSAR 形变信息作为反演的观测数据,以贝叶斯反演方法为理论基础来分析涩北气田储层深度、走向、倾角等参数。贝叶斯反演方法是基于统计理论的随机反演算法,结合马尔科夫链条蒙特卡洛(Markov chain Monte Carlo method, MCMC)采样方法

表 1 长椭球模型参数表

Table 1 Prolate spheroid source parameters table

参数	含义
X_0/m	椭球源中心 X 坐标
Y_0/m	椭球源中心 Y 坐标
d/m	椭球源中心深度(向下为正)
a/m	长半轴长度
γ	半轴间无量纲纵横比,等于 1 时为球形
$\varphi/(^\circ)$	走向,是长半轴相对于北方向的夹角
$\theta/(^\circ)$	倾角,是长半轴相对于水平方向的夹角
P	压力变化/剪切模量(无量纲)



O 为模型参考原点; M_0 为椭球源中心; M'_0 为椭球源中心在地表的投影; b 为短半轴; $\gamma = b/a$ 为半轴间无量纲纵横比

图 8 长椭球模型示意图
Fig. 8 Schematic diagram of Prolate spheroid source dislocation model

和 Metropolis-Hastings 法则计算每个参数概率密度函数的估计值,并获得模型参数的最优解^[18-19]。贝叶斯框架可表示为

$$p(m | d) = \frac{p(d | m)p(m)}{p(d)} \quad (2)$$

式(2)中: $p(m | d)$ 为模型参数 $m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 的后验概率密度函数; $p(d | m)$ 为似然函数,表示在已知观测数据 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 的情况下随着模型参数 m 变化的函数; $p(m)$ 为 m 的先验概率密度函数; $p(d)$ 为一常量信息。具体贝叶斯反演流程如图9所示。

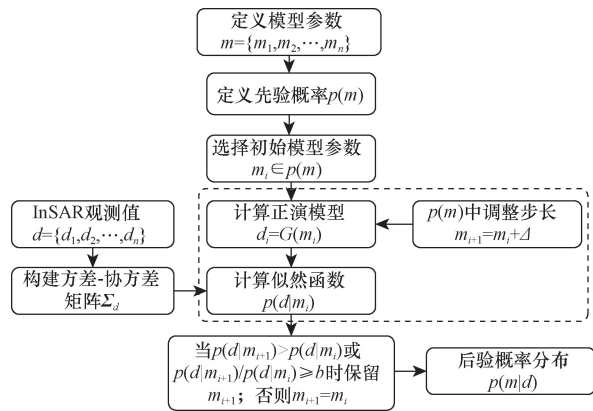


图9 贝叶斯参数反演流程图

Fig. 9 Flow chart of the Bayesian parameter inversion

3.2 反演结果分析

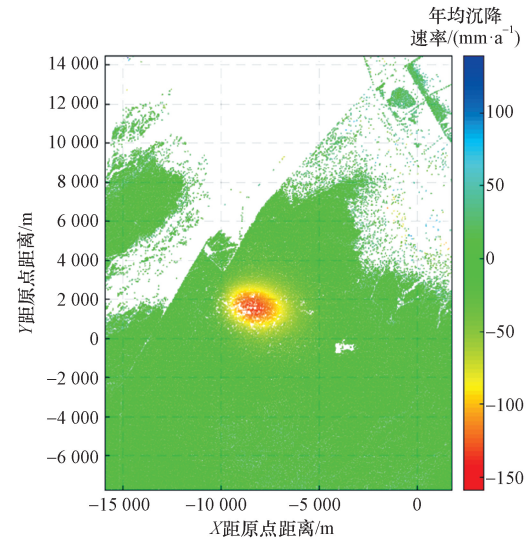
3.2.1 台南气田

基于长椭球模型,以 SBAS-InSAR 测量的地表平均形变速率为约束,在无形变区选取 O_A ($93.88^\circ E, 37.37^\circ N$) 作为模型参考原点,对台南气田储层参数进行反演,通过后验贝叶斯反演方法获取的台南气田储层最优参数如表2所示。图10分别展示了 InSAR 观测形变、使用最优参数组合正演所得模拟形变及其与观测形变之间的残差。平面坐标点正负值表示为东正西负,北正南负,都是指相对于坐标原点的距离。从表2来看,台南气田储层中心点投影至地表的平面点 M'_A 位于地表坐标原点 O_A 的西北部,即 8 920.11 m 西,1 487.42 m 北,根据该距离、方向及 O_A 位置推算,可知投影点 M'_A 的地理坐标位置 ($93.78^\circ E, 37.37^\circ N$),发现其与沉降

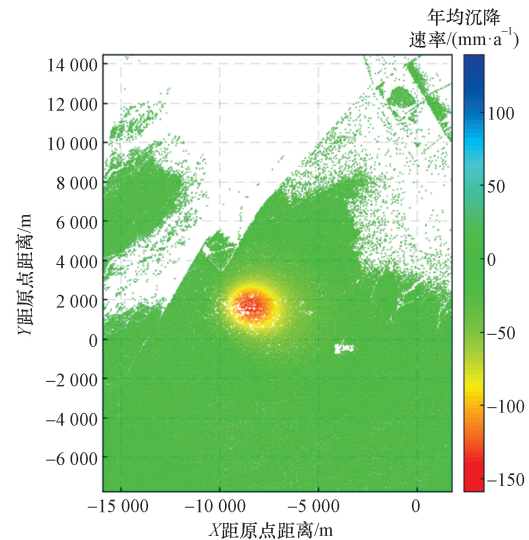
表2 台南气田储层最优拟合参数

Table 2 Optimal fitting parameters of Tainan gas field

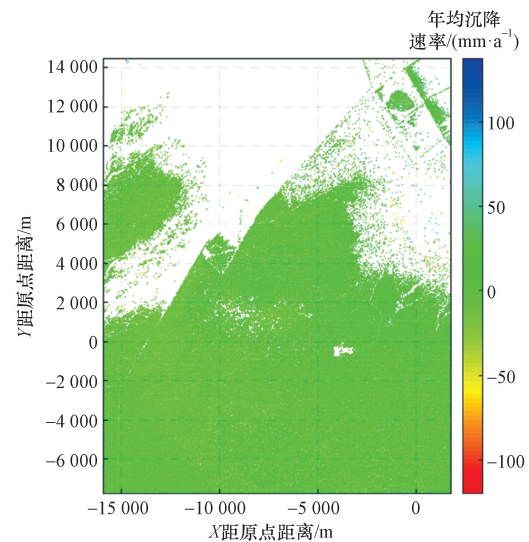
模型参数	最优估值	模型参数	最优估值
X_0 / m	-8 920.11	γ	0.08
Y_0 / m	1 487.42	$\varphi / (^\circ)$	195.46
d / m	1 928.30	$\theta / (^\circ)$	-19.95
a / m	49.46	P	-537.55



(a) InSAR 观测形变



(b) 模拟形变



(c) 两者残差

图10 台南气田观测形变与模拟形变对比

Fig. 10 Comparison between the observed and the simulated deformation of Tainan gas filed

中心 A(93.78°E,37.38°N) 十分接近,较符合开采情况,储层深度约 1 928.30 m,倾角约 -19.95°,与台南气田气藏埋深 800~2 000 m,构造平缓等情况基本相符,储层走向与北方向夹角约 195.46°,储层长半轴约 49.46 m,半轴间无量纲纵横比为 0.08。

由图 10 可知,从空间分布来看,长椭球模型模拟的形变结果与观测结果空间分布特征十分一致,且 InSAR 观测结果和模拟值两者的残差基本在零值附近,进一步说明反演所得台南气田储层参数较为可靠。

3.2.2 涩北 1 号气田

基于长椭球模型,在 SBAS-InSAR 地表平均形变速率的约束下,以 O_B (94.36° E,37.29° N) 作为参考原点,对涩北 1 号气田储层参数进行反演,获取的涩北 1 号气田储层最优参数如表 3 所示。涩北 1 号气田储层中心点投影至地表的平面点 M'_B 相对于地表坐标原点 O_B 为 6 059.20 m 西,356.31 m 北,即可知投影点 M'_B (94.29° E, 37.29° N) 与沉降中心 B (94.30° E, 37.30° N) 同样十分接近,符合开采情况,储层深度约 2 129.26 m,储层走向与北方向夹角约 185.28°,储层长半轴约 104.73 m,半轴间无量纲纵横比为 0.04,相对于水平面倾角约 -48.15°,储层倾角较大。

图 11 分别展示了 InSAR 观测形变、使用最优参数组合正演所得模拟形变及其与观测形变之间的残差。InSAR 观测结果与长椭球模型模拟的形变结果空间分布较为一致,二者残差主要位于北部沉降区边缘,沉降区整体残差在零值附近,反演所得涩北 1 号气田储层参数是较为可靠的。

表 3 涩北 1 号气田储层最优拟合参数

Table 3 Optimal fitting parameters of Sebei No. 1 gas field

模型参数	最优估值	模型参数	最优估值
X_0/m	-6 059.20	γ	0.04
Y_0/m	356.31	$\varphi/^\circ$	185.28
d/m	2 129.26	$\theta/^\circ$	-48.15
a/m	104.73	P	-998.76

3.2.3 涩北 2 号气田

基于长椭球模型,以 SBAS-InSAR 测量的地表平均形变速率为约束,在无形变区选取 O_C (94.05° E, 37.35° N) 作为模型参考原点,对涩北 2 号气田储层参数进行反演,通过后验贝叶斯反演方法获取的涩北 2 号气田储层最优参数如表 4 所示。涩北 2 号气田储层中心点投影点 M'_C 在参考原点 O_C 的东北部,即为 7 457.00 m 东,650.71 m 北,即可知涩北 2 号气田储层中心点在地表的投影点 M'_C (94.13° E,37.36° N) 与沉降中心 C(94.14° E,37.36° N) 也是十分接近,符合开采情况,储层深度约 2 176.54 m,储层走向与北方

向夹角约 206.19°,储层长半轴约 146.93 m,半轴间无量纲纵横比为 0.03,倾角约 -16.51°,较为平缓。

表 4 涩北 2 号气田储层最优拟合参数

Table 4 Optimal fitting parameters of Sebei No. 2 gas field

模型参数	最优估值	模型参数	最优估值
X_0/m	7 457.00	γ	0.03
Y_0/m	650.71	$\varphi/^\circ$	206.19
d/m	2 176.54	$\theta/^\circ$	-16.51
a/m	146.93	P	-790.83

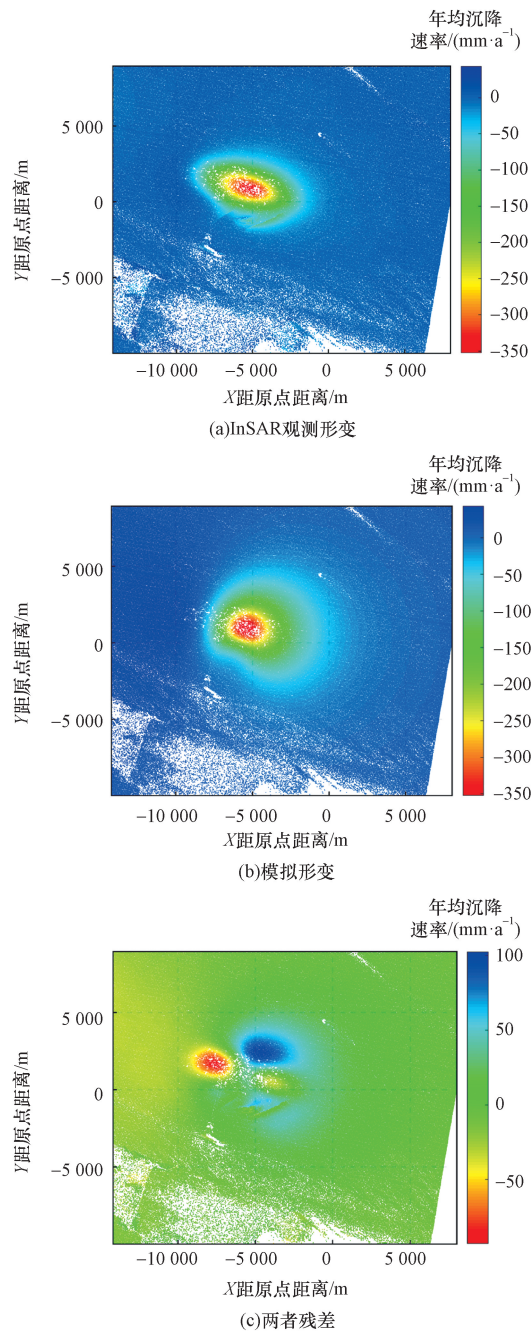


图 11 涩北 1 号气田观测形变与模拟形变对比
Fig. 11 Comparison between the observed and the simulated deformation of Sebei No. 1 gas field

图 12 分别展示了 InSAR 观测形变、使用最优参数组合正演所得模拟形变及其与观测形变之间的残差。从空间分布来看,长椭球模型模拟的形变结果与观测结果空间分布特征较为一致,残差主要分布于沉降区东部及南部边缘区,残差较小,说明反演所得台南气田储层参数较为可靠。

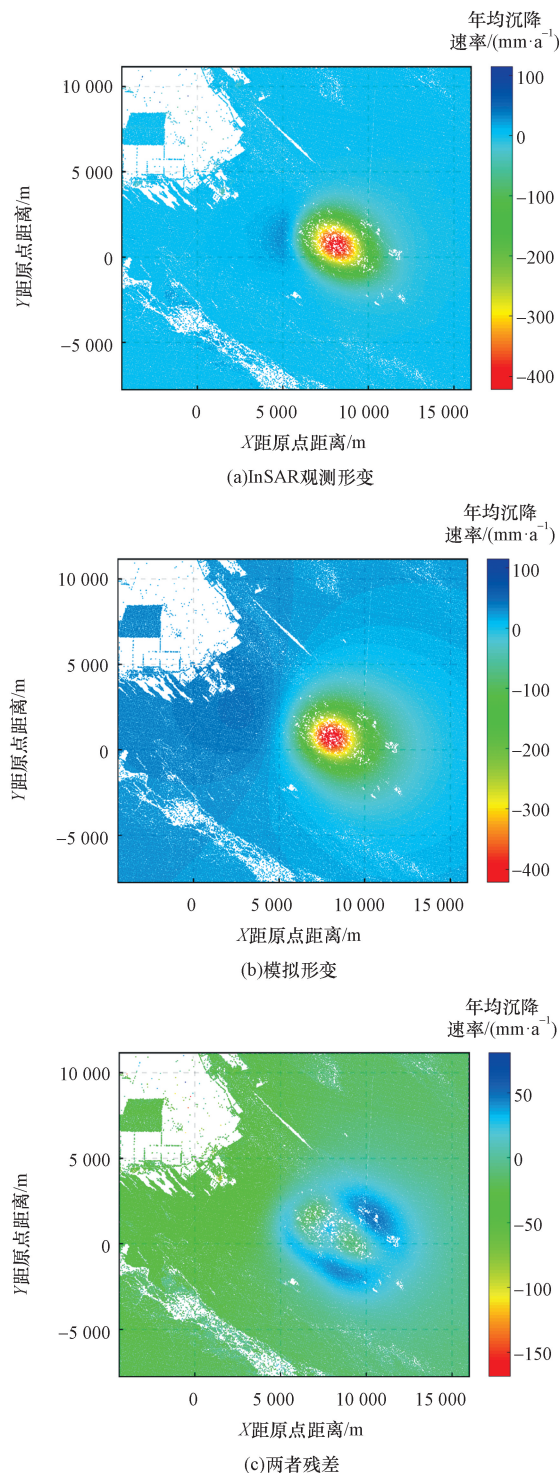


图 12 涩北 2 号气田观测形变与模拟形变对比
Fig. 12 Comparison between the observed and the simulated deformation of Sebei No. 2 gas field

4 结论

以 2022 年 2 月 18 日—2023 年 9 月 17 日间的 25 景 Sentinel-1A 降轨 SAR 数据为数据源,利用 SBAS 时序 InSAR 方法对涩北气田区进行了地表沉降监测,并以监测结果作为反演观测量,基于长椭球模型为对涩北气田区进行储层参数反演,得出结论如下。

(1) 台南气田、涩北 1 号、2 号气田均出现显著的沉降漏斗,其沉降趋势呈现为持续快速线性沉降,并且涩北 1 号、2 号气田地地表沉降相对更加严重。其中,台南气田整体年均沉降速率为 $-124 \sim -109 \text{ mm/a}$,累计沉降量超过 150 mm ;涩北 1 号气田区年均沉降速率为 $-275 \sim -34 \text{ mm/a}$,累计沉降量超过 400 mm ;涩北 2 号气田区年均沉降速率为 $-329 \sim -89 \text{ mm/a}$,累计沉降量超过 500 mm 。

(2) 通过长椭球模型反演了台南气田、涩北 1 号、2 号气田储层中心投影坐标、深度、走向等相关参数信息,并将最优参数正演所得形变与观测形变比较后,发现二者残差较小,空间分布较为一致,表明了基于 SBAS 时序 InSAR 观测形变,结合长椭球模型反演涩北气田储层参数具有一定的可行性。

参 考 文 献

- [1] 马力宁,王小鲁,朱玉洁,等. 柴达木盆地天然气开发技术发展[J]. 天然气工业, 2007, 27(2): 77-80.
Ma Lining, Wang Xiaolu, Zhu Yujie, et al. Introduction of technology improvement on natural gas development in the Qaidam Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(2): 77-80.
- [2] 刘永,王景鹤,赵文凯,等. 青海油田弱胶结生物泥岩气压裂裂缝起裂[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 195-204.
Liu Yong, Wang Jinghe, Zhao Wenkai, et al. Fracture initiation of weakly consolidated biological mudstone gas fracturing in Qinghai oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(1): 195-204.
- [3] 陈志谋,胡波,陈金座,等. 利用 InSAR 技术监测石油开采引起的地表形变[J]. 测绘通报, 2017(11): 42-46.
Chen Zhimou, Hu Bo, Chen Jinzuo, et al. Monitoring the surface deformation caused by oil exploration based on InSAR [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(11): 42-46.
- [4] 张静,丁黄平,刘纯,等. 基于 InSAR 技术的盘锦地区地面沉降研究[J]. 世界地质, 2019, 38(2): 574-580.
Zhang Jing, Ding Huangping, Liu Chun, et al. Monitoring land subsidence in Panjin area based on InSAR method [J]. Global Geology, 2019, 38(2): 574-580.
- [5] 龚志强,唐伟,蒋金豹,等. 基于时序 InSAR 技术的辽河三角洲油田地面沉降监测与建模 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, 49(8): 1422-1433.
Gong Zhiqiang, Tang Wei, Jiang Jinbao, et al. Monitoring and modeling of land subsidence in Liaohe Delta oilfield based on time series InSAR technology [J]. Geomatics and Information Science of

- Wuhan University, 2024, 49(8): 1422-1433.
- [6] Xu H, Dvorkin J, Nur A. Linking oil production to surface subsidence from satellite radar interferometry [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(7): 1307-1310.
- [7] 张东晓. 时序 InSAR 技术在油气田形变监测中的应用 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
Zhang Dongxiao. Deformation monitoring using time series InSAR technology over oilfield [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [8] 李春进, 杨崇, 七珂珂, 等. 利用地表沉降信息反演油田储层参数 [J]. *测绘地理信息*, 2022, 47(3): 56-60.
Li Chunjin, Yang Chong, Qi Keke, et al. Inversion of oilfield's reservoir parameters by surface subsidence information [J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(3): 56-60.
- [9] Davis P M. Surface deformation due to inflation of an arbitrarily oriented triaxial ellipsoidal cavity in an elastic half-space, with reference to Kilauea volcano, Hawaii [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B7): 7429-7438.
- [10] 孙永亮, 王小鲁, 王玉善, 等. 柴达木盆地台南气田边水水侵影响因素及剩余气分布特征研究 [J]. *录井工程*, 2020, 31(2): 106-112.
Sun Yongliang, Wang Xiaolu, Wang Yushan, et al. Study on influence factors of edge water influx and distribution characteristics of remaining gas in Tainan gas field, Qaidam Basin [J]. *Mud Logging Engineering*, 2020, 31(2): 106-112.
- [11] 祁文珍, 刘健, 寇福德, 等. 台南气田浅气层组储层特征 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2019, 39(13): 124-125.
Qi Wenzhen, Liu Jian, Kou Fude, et al. Reservoir characteristics of shallow gas formation in Tainan gas field [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2019, 39(13): 124-125.
- [12] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [13] Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23): L23611.
- [14] 李德仁, 廖明生, 王艳. 永久散射体雷达干涉测量技术 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, 29(8): 664-668.
Li Deren, Liao Mingsheng, Wang Yan. Progress of permanent scatterer interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(8): 664-668.
- [15] 樊昱初, 吕义清, 杨娜. 基于 SABS-InSAR 的保德矿区地表形变监测与分析 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(3): 941-951.
Fan Yuchu, Lü Yiqing, Yang Na. Monitoring and analysis of surface deformation in Baode mining area based on SABS-InSAR [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(3): 941-951.
- [16] 张世昊, 陶秋香, 刘国林, 等. 联合时序 SBAS-InSAR 与 GACOS 的青岛胶州湾大桥形变监测与分析 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(5): 2074-2082.
Zhang Shihao, Tao Qiuxiang, Liu Guolin, et al. Deformation monitoring and analysis of Qingdao Jiaozhou Bay Bridge by combining time-series SBAS-InSAR and GACOS [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(5): 2074-2082.
- [17] 杨崇, 刘国祥, 于冰, 等. 基于 InSAR 形变的辽河油田曙光采油厂储层参数反演 [J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 209-215.
Yang Chong, Liu Guoxiang, Yu Bing, et al. Inversion of reservoir parameters in Shuguang oil production plant of the Liaohe oilfield based on InSAR deformation [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(1): 209-215.
- [18] Bagnardi M, Hooper A. Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: a Bayesian approach [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2194-2211.
- [19] Bagnardi M, Hooper A J. GBIS (Geodetic Bayesian Inversion Software): rapid inversion of InSAR and GNSS data to estimate surface deformation source parameters and uncertainties [C]// AGU Fall Meeting. New Orleans: AGU Fall Meeting Abstracts, 2017: 217132343.