

谢亚奇, 杨红磊, 梁卫涛, 等. 黑河流域 2019—2020 年地表形变 InSAR 监测与生态响应分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 191-202. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.015

XIE Yaqi, YANG Honglei, LIANG Weitao, et al. InSAR monitoring and ecological response analysis of surface deformation in Heihe River Basin from 2019 to 2020[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 191-202. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.015

# 黑河流域 2019—2020 年地表形变 InSAR 监测与生态响应分析

谢亚奇<sup>1</sup>, 杨红磊<sup>2</sup>, 梁卫涛<sup>1</sup>, 丁武<sup>1</sup>, 王跃东<sup>2</sup>

(1. 陕西省一三一煤田地质有限公司, 陕西韩城 715400; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:**【目的】黑河流域是我国西北干旱—半干旱区第二大内陆河流域, 已有研究大多集中在对其生态环境开展研究, 对其内旱作农业地下水开采和矿产资源开发等相关地表形变的研究不足。【方法】针对黑河流域地表稳定性监测需求, 采用一种改进型 IPTA-InSAR 技术对 2019—2020 年间覆盖研究区域的两个轨道共计 101 景 Sentinel-1 卫星 SAR 影像进行解算, 获得地表形变序列, 利用邻轨重叠区独立解算结果进行可靠性验证, 并结合高分辨率光学遥感数据对形变特征进行综合分析。【结果】结果显示: 邻轨结果间均方根误差为 0.2 mm/a; 揭示流域内存在 6 处显著形变区: 最大年平均沉降速率达 56 mm/a, 沿卫星视线向最大季节性沉降和抬升量达 -70 mm 和 60 mm。【结论】时空分布特征表明, 形变机制具有显著异质性: (1) 中游绿洲灌区因季节性地下水超采引发周期性沉降; (2) 酒泉东部长城沿线盐碱地受雨季地下水抬升影响发生季节性回弹; (3) 金昌露天矿与山丹煤矿区因开采活动导致持续沉降。成果可为流域水资源优化配置、矿区开采动态管控及生态脆弱区保护提供科学依据, 并对西北内陆河流域人地系统协调发展提供重要参考。

**关键词:** InSAR; 黑河流域; 形变监测; 农业灌溉; 生态健康; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.015

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0191-12



## InSAR monitoring and ecological response analysis of surface deformation in Heihe River Basin from 2019 to 2020

XIE Yaqi<sup>1</sup>, YANG Honglei<sup>2</sup>, LIANG Weitao<sup>1</sup>, DING Wu<sup>1</sup>, WANG Yuedong<sup>2</sup>

(1. Shaanxi 131 Coal Geology Co., Ltd., Hancheng 715400, Shaanxi, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The Heihe River Basin (HRB) is the second-largest inland river basin in the arid to semi-arid region of

收稿日期: 2025-04-24; 修回日期: 2025-06-09; 录用日期: 2025-06-13; 网络出版日期: 2025-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42404022); 陕西省煤田地质集团有限公司科技研发项目(SMDZ-2023CX-1)

作者简介: 谢亚奇(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事形变监测数据处理与煤田地质测绘应用研究。E-mail: 277511606@qq.com

通信作者: 杨红磊(1983—), 男, 教授, 系主任, 博士, 主要从事地质环境监测与减灾防灾研究。E-mail: hongleiyang@cugb.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

northwest China. Existing studies have mostly focused on its ecological environment, while research on surface deformation related to groundwater extraction for dryland agriculture and mineral resource exploitation remains insufficient. [Methods] In response to the need for surface stability monitoring in the HRB, an improved IPTA-InSAR technique was employed to process a total of 101 Sentinel-1 SAR images from two orbital tracks covering the study area from 2019 to 2020, generating a time series of surface deformation. The reliability of the result was verified using independently processed data from overlapping adjacent tracks. Furthermore, high-resolution optical remote sensing data were integrated to comprehensively analyze deformation characteristics. [Results] The result showed that the root mean square error between adjacent track result was 0.2 mm/year, and six significant deformation zones were identified within the basin. The maximum annual average subsidence rate reached 56 mm/year, and the maximum seasonal subsidence and uplift along the satellite line of sight were -70 mm and 60 mm, respectively. [Conclusion] The spatiotemporal distribution characteristics indicate significant heterogeneity in deformation mechanisms: (1) periodic subsidence due to seasonal over-extraction of groundwater in midstream oasis irrigation areas; (2) seasonal rebound influenced by groundwater rise during the rainy season in the saline-alkali lands along the Great Wall in eastern Jiuquan; and (3) continuous subsidence caused by mining activities in the Jinchang open-pit mine and Shandan coal mining areas. The findings of this study can provide a scientific basis for the optimized allocation of water resources in river basins, dynamic regulation of mining operations in mining areas, and protection of ecologically vulnerable zones, and offer important references for the coordinated development of human-land systems in the inland river basins of Northwest China.

**Keywords:** InSAR; Heihe River Basin; deformation monitoring; agricultural irrigation; ecological health; influencing factors

## 0 引言

位于青藏高原东北缘的祁连山系,是河西走廊的重要组成部分之一,也是我国西部重要的生态屏障与水源涵养区,其东南麓发育着西北干旱—半干旱区第二大内陆河流域——黑河流域。该流域以冰川融水为主要补给来源,构建了集山地、绿洲、荒漠于一体的复合生态经济系统。近年来,随着“数字黑河”工程与“黑河综合遥感联合试验”的持续推进,学界围绕流域水循环<sup>[1]</sup>、生态响应<sup>[2-4]</sup>、地表能量平衡<sup>[5-7]</sup>等关键科学问题利用地/空/星载的主/被动遥感以及地面水文/气象/生态观测等多种技术开展了多维度深入研究,形成了系列创新成果<sup>[8-9]</sup>。基于上述研究领域及生态指标对黑河流域地质水文生态进行综合遥感监测虽然已经可以一定程度上了解内陆河流域的社会经济发展和生态健康状态,但是,以形变为主要表征参量的地表稳定性同样可以直观反映流域内高强度人类活动(包括经济建设、绿洲农业开发、矿产资源开采、地下水超采等)以及生态自然演化引发的系列地质和生态环境问题。然而,现有针对黑河流域地表形变监测的研究主要局限于局部区域的特色监测,如冰川冻土,缺乏在区域尺度对黑河流域绿洲区地表稳定性的系统定量精细调查分析。鉴于水环境及水利安全等对当地生态环境的重大影响<sup>[10-11]</sup>,在黑河流域开展广域形变监测和水资源与环境评估具有重要价值。

近年来,合成孔径雷达干涉测量(Interferometric

Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术以其全天候/全天候/面域/高效/高精度/非接触等特点,为地表形变精细监测提供了一种独特且不可替代的解决方案。InSAR技术通过相位干涉差分可实现对地表单时相形变以及形变序列的厘米级甚至毫米级精度反演,在地震同震或震间形变<sup>[12-13]</sup>、火山活动<sup>[14-15]</sup>、城市基础设施监测<sup>[16-17]</sup>、矿山开采沉降<sup>[18-19]</sup>、地质灾害监测<sup>[20-21]</sup>及农业灌溉开采地下水<sup>[22-23]</sup>等领域取得了众多成果。此外,随着SAR卫星及数据的越加丰富,广域智能化InSAR形变监测技术及其应用也获得了快速发展<sup>[24-26]</sup>。InSAR技术的发展和丰富的SAR数据为全球/国家/区域/工程等各种尺度的地表形变监测和分析提供了良好的基础条件,也为该技术在黑河流域的广域应用提供可能。

目前,InSAR技术在祁连山—黑河研究区已取得部分研究成果。2017年,文献[27]利用高分辨率TerraSAR-X/TanDEM-X数据与SRTM DEM进行差分,得出老虎沟12号冰川2000年至2014年高程年平均变化值,证明利用TerraSAR-X/TanDEM-X数据监测祁连山冰川高程变化的良好可行性。2018年,CHEN等<sup>[28]</sup>利用17景ALOS-1 PALSAR影像和永久散射体InSAR(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)技术对祁连山俄博岭冻土形变进行了监测,论证了利用PS-InSAR研究永久冻土冻融过程导致的地表形变反演的潜力,以及该地区冻融对青藏高原和北极广大地区的影响。2019年,陈玉兴等<sup>[29]</sup>利用Sentinel-1 SAR数据对2014—2016年间黑河上游的冻土区时序形变进

行了监测, 并利用地温数据和 Stefan 模型对其季节性形变幅度进行了反演, 论证了地貌、土壤类型和活动层厚度对冻土形变的影响。2023 年, PENG 等<sup>[30]</sup>利用 Sentinel-1 数据, 采用基于温度和土壤湿度的两种方法对青藏高原东北部黑河流域多年冻土区的地表形变进行了监测, 并估算了当地活动层厚度, 发现基于土壤湿度的方法对计算形变具有更高的精度。此外, 还有部分学者基于 InSAR 技术对金川矿区地表三维形变进行研究<sup>[31]</sup>。可以看出, 利用 InSAR 技术对黑河流域的监测研究主要集中在上游冰川冻土区域或矿产开采等场景, 对黑河流域平原绿洲区人类活动驱动的地表稳定性的全域监测调查研究较少被报道。鉴于地表形变对生态环境健康评价的重要性<sup>[32]</sup>, 在黑河流域绿洲区开展广域 InSAR 形变监测具有重要研究和应用价值。

本研究以祁连山东北缘黑河流域绿洲经济带为重点区域, 通过构建 2019—2020 年 Sentinel-1 卫星邻轨多图幅影像时序数据集, 采用改进型干涉点目标分析 InSAR (Interferometric Point Target Analysis InSAR, IPTA-InSAR) 技术, 集成地形相关大气延迟误差改正与时序精化数据处理策略, 实现黑河流域地表形变毫米级监测。在此基础上, 结合光学遥感解译、水文地质调查及人类活动统计数据, 构建“形变特征识别—形变机理分析”的研究框架, 旨在揭示黑河流域平原区地表形变的时空发育演化规律, 为流域生态安全维护与可持续健康发展提供有力技术和数据支撑。

## 1 研究区域与 InSAR 监测

### 1.1 研究区域背景

祁连山位于青藏高原东北部, 孕育了我国六个流域的水源<sup>[33]</sup>。在祁连山东北缘发育有我国西北干旱半干旱地区典型流域型绿洲经济区, 其中, 最具代表性的是我国第二大内陆河流域—黑河流域(见图 1)。黑河流域是一个以水循环为纽带的山岳冰川融水/降雨、绿洲和荒漠为主要特征的多元景观结构<sup>[34]</sup>。黑河流域东北部和东部分别与巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠毗邻, 北部及西北部由戈壁环绕, 其水资源主要来源于祁连山区的冰川融水和降雨。黑河流域上游为祁连山构造隆起区, 地势高亢, 中游地势总体由东南向西北递减, 后至北部金塔盆地稍有递增, 下游至黑河末端的额济纳旗缓慢隆起带内凹陷<sup>[35]</sup>。

黑河流域气候在东西和南北向上具有明显的差异性, 总体上年平均气温北高南低, 年降水量南高北低, 年蒸发量西北高东南低。黑河流域内地表水的时

空分布主要取决于祁连山区冰雪融水和降雨, 年内变化呈明显的周期性。枯水季为冬春季(10 月至来年 3 月), 降水以固态形式续存。在 4—6 月, 随着温度升高, 冰雪融水加速, 但这一时期正值流域中游种植区的春灌高峰期, 因此地表径流量降至低值甚至出现河床断流。雨季主要集中在 7—9 月。在雨季, 降水量增多, 冰川融水量加大, 地表径流量超过全年径流总量的 55%。在 9 月份, 农田区灌溉回归水和地下水大量溢出, 形成地表径流量高峰。随着 10 月份的种植区冬灌以及降水量的减小, 径流量再次降低, 至 11 月达到最低值。流域内人口分布、人类活动以及种植区的空间分布等与流域内水资源的分布高度相关。黑河流域上游主要分布有发达的牧业和旅游型经济; 中游地区分布有高度发达的灌溉农业, 集中了流域内 60% 的耕地面积, 其中, 玉米和小麦为主要经济作物; 下游为荒漠区, 主要以荒漠牧业为主<sup>[35]</sup>。

### 1.2 InSAR 监测

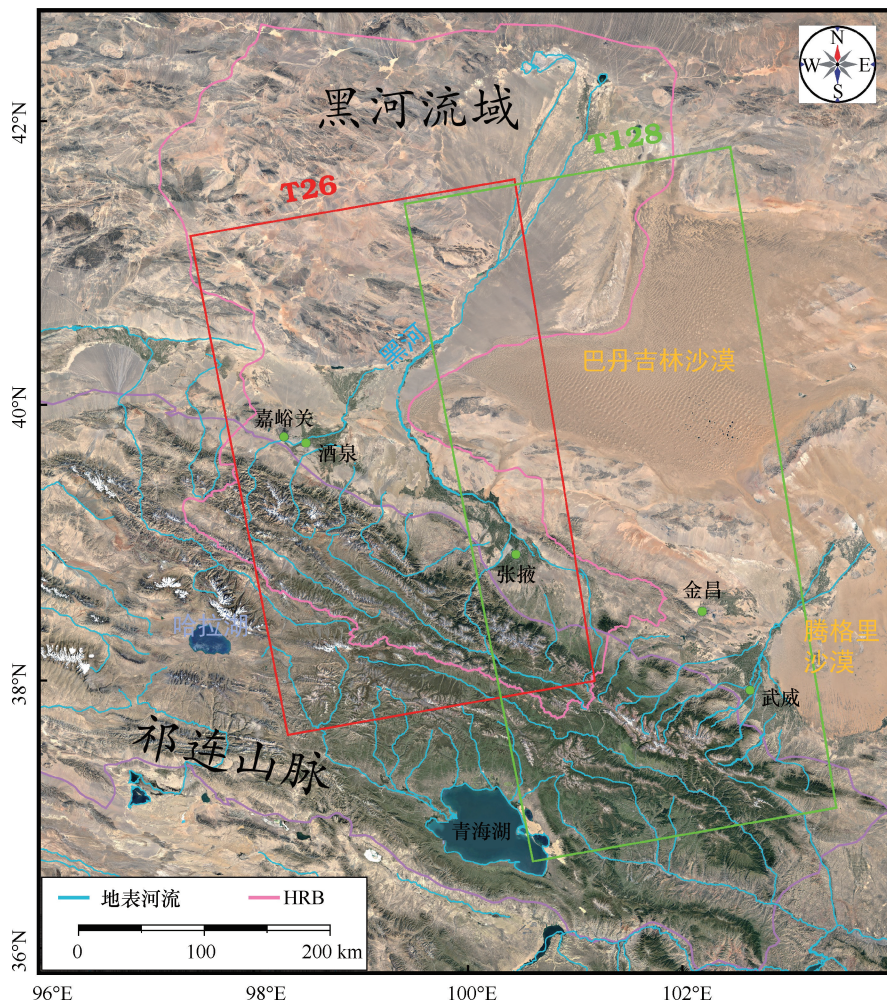
#### 1.2.1 InSAR 数据

本文获取了 2019 年 1 月至 2020 年 12 月期间覆盖黑河流域的 Sentinel-1 卫星干涉宽幅模式下两个相邻升轨单视复数(Single Look Complex, SLC) SAR 影像集。每个轨道数据在数据预处理时分别由 2 至 3 个邻近图幅拼接而成<sup>[36]</sup>。T26 和 T128 轨道分别收集到 47 景和 54 景影像。影像覆盖范围如图 1 所示, 影像信息如表 1 所列。

#### 1.2.2 数据处理

首先根据研究区域范围和 Sentinel-1 卫星干涉宽幅(Interferometric Wide, IW) 成像模式下获得的研究区域邻轨多图幅 SAR 数据集的特点, 基于 GAMMA 软件将同一轨道的多个图幅影像集在数据预处理过程中进行整合。然后, 分别将每个轨道生成的所有 SAR 影像配准并重采样到同一主影像, 配准精度优于 1/8 像素。之后, 基于黑河流域的地理空间范围, 将配准后的影像优化裁剪到与监测区域适配的范围, 生成如图 1 所示沿轨道的长条带 IW SAR 数据集。最后, 本文采用一种改进的 IPTA-InSAR 技术<sup>[37-38]</sup>依次处理上述两个轨道的 SAR 数据集, 并利用一种广域 InSAR 形变结果拼接融合方法对多轨道独立解算得到的形变结果之间的基准偏差进行改正, 获得研究区域的整体形变结果。本文所用方法流程如图 2 所示。

在每个轨道数据集的处理中, 基于小基线集的思想<sup>[39]</sup>, 通过设定时间基线阈值(相邻 3 景)和空间基线阈值(200 m), 将 SAR 数据组成多时相 InSAR 干涉对(见表 1), 组成的小基线集网络如图 3 所示。



红色(T26)和绿色(T128)矩形分别为本文所用裁剪配准过后的 Sentinel-1 卫星两个邻轨 InSAR 数据集覆盖

图 1 黑河流域及其周边地物地貌

Fig. 1 Geographical features and landforms of Heihe River Basin and its surroundings

表 1 所用 SAR 影像信息

Table 1 Information of SAR images used

传感器	Sentinel-1	
	T26	T128
轨道号	20190109—20201229	20190102—20201128
获取时间	47	54
影像数/景	135	156
干涉对数/个	干涉宽幅 (IW)	
观测模式	29.1°~46.0°	
入射角	350.8°	
飞行方位角		

之后, 基于 30 m 分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM 和瑞士 GAMMA 软件<sup>[40]</sup>, 选用距离向与方位向的多视视数比为 20 : 4 对生成的小基线集干涉对依次进行差分干涉。在该多视视数下经以外外部 SRTM DEM 为参考基准的地理编码和重采样后得到的最终监测成果在东西和南北向的分辨率约为 56 m。之后, 设置相干性阈值( $\geq 0.3$ )、后向散射强度( $\geq -20$  dB)、振幅离差指数( $\leq 0.3$ )

筛选高质量点目标, 并采用一种地形相关大气延迟误差改正策略抑制局部大气延迟误差<sup>[41]</sup>。在 IPTA 数据处理过程中引入多元线性回归迭代算法, 同步解算线性形变率、季节性形变分量及轨道残余误差, 削弱失相干噪声、地形残差及大气延迟误差的影响, 获得该图幅内的时序形变及形变速率结果。最后, 借鉴多图幅形变基准拼接融合理论<sup>[26]</sup>, 将两个相邻轨道数据集解算的雷达视线向形变结果转换到垂向, 以邻轨重叠区域重复观测的统计量为观测值对两个图幅基准偏差进行纠正, 获得研究区域广域形变结果(见图 4)。

### 1.2.3 结果可靠性验证

从图 4 可以看出, 相邻轨道独立解算结果在经过平差改正后获得的广域形变结果具有良好的空间一致性, 这可以定性的验证本文结果的可靠性。由于无法获得当地在 InSAR 监测时间段的水准或 GNSS 地面实

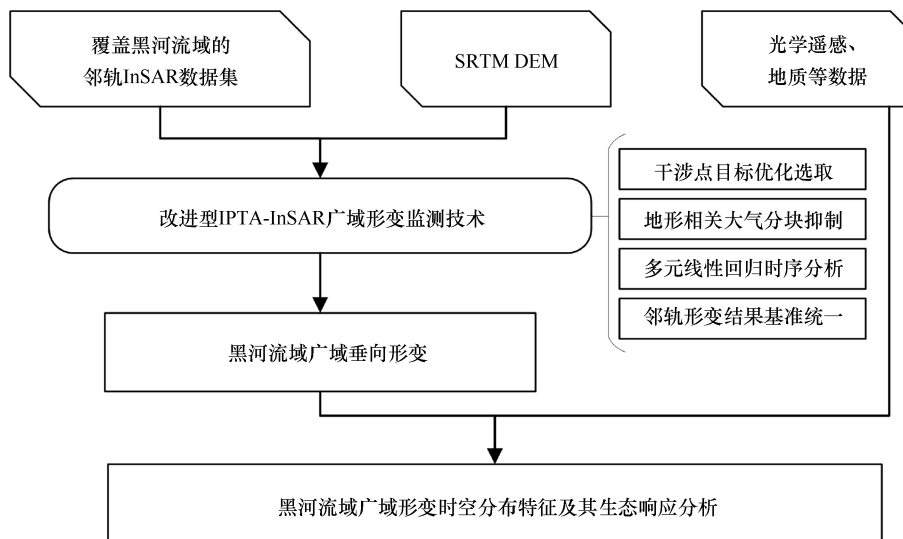
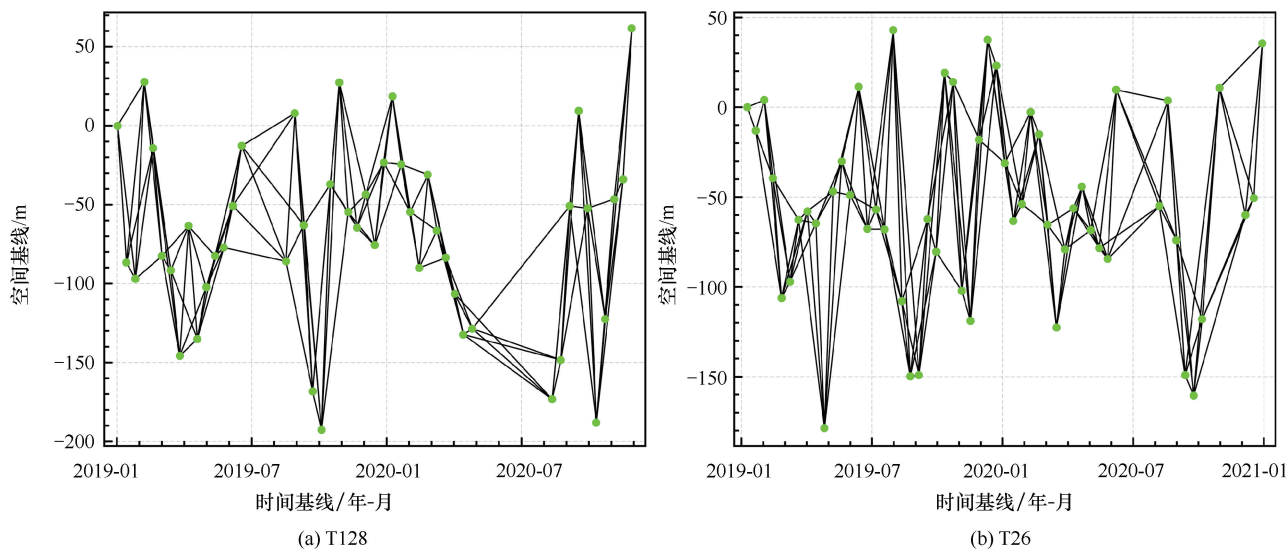


图 2 采用的方法流程

Fig. 2 Flowchart of method



绿色圆点标识了 SAR 影像获取时刻及与首景影像的空间基线, 黑色线为邻近 SAR 影像之间的干涉对组合情况

图 3 小基线集干涉对组合情况

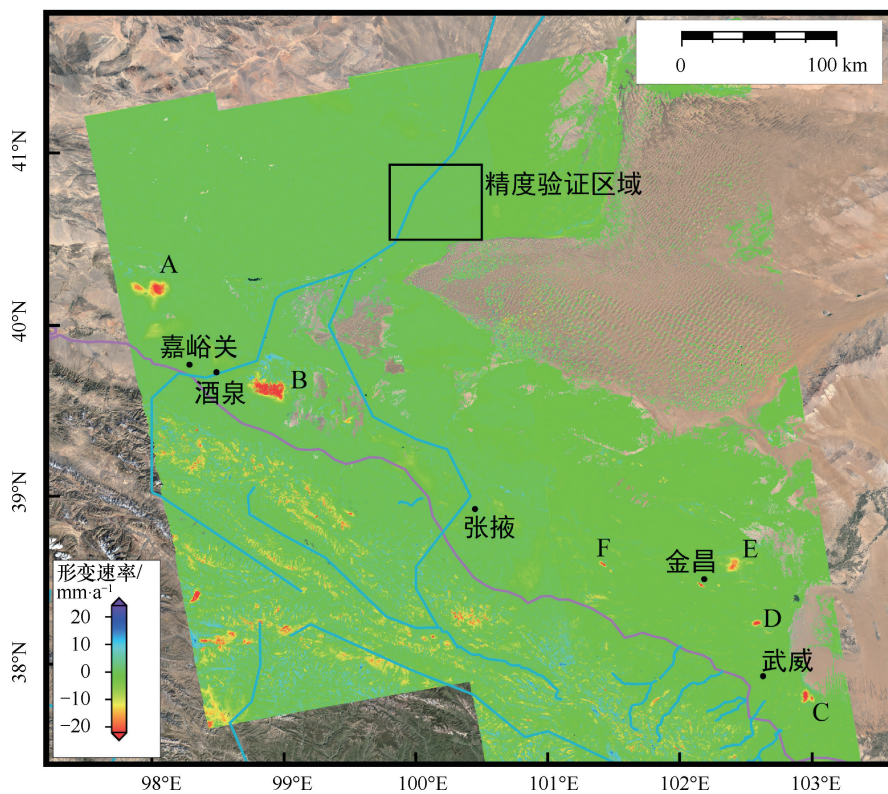
Fig. 3 Combination of small baseline set interferometric pairs

测数据, 我们在独立解算的邻轨 (T26 和 T128) 结果重叠区域选定一个公共区块 (见图 5 中黑色方框), 并对该区块内相同监测点处的形变速率结果进行对比 (见图 5)。图 5 中红色虚线绘制了两个轨道形变结果之间的 3 倍中误差 ( $RMSE$ ) 界限。从定量的角度, 两个轨道独立解算得到的形变速率之间具有良好的一致性。绝大多数点的误差均小于 3 倍中误差。我们计算了 T26 和 T128 轨道形变结果之间的均方根误差为  $0.2 \text{ mm/a}$ 。邻轨独立解算结果之间良好的一致性和较小的误差证明了监测结果的可靠性。

## 2 InSAR 形变结果

### 2.1 形变整体空间分布

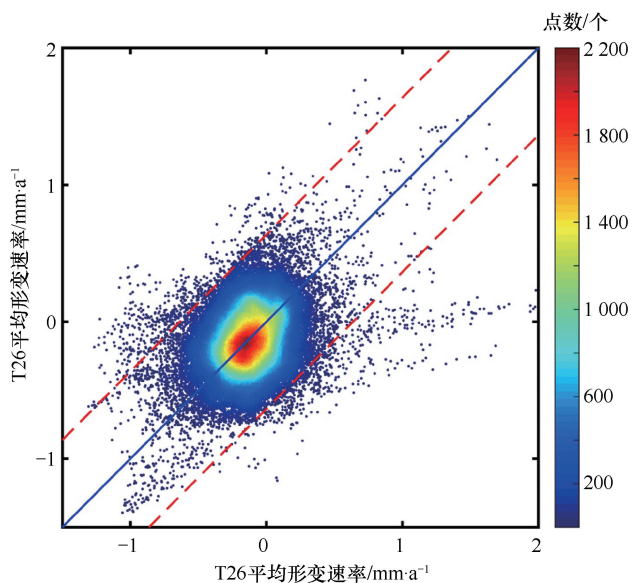
通过对 T26 和 T128 两个轨道 InSAR 数据集进行时序解算, 得到了黑河流域 2019—2020 年间的广域形变结果, 平均形变速率如图 4 所示。由图 4 可以看出, 以张掖市及其西北部地区为代表的黑河流域中下游大部分区域的地表在近两年较为稳定, 形变速率普遍小于  $10 \text{ mm/a}$ 。形变主要分布在祁连山区和绿洲平原区, 且主要以沉降为主。本文主要关注与人类活动密切的祁连山东北缘绿洲流域区, 因此不对祁连山区



黑色方框为选定的精度验证区域

图 4 黑河流域 2019—2020 年间平均形变速率结果

Fig. 4 Average deformation rate results of Heihe River Basin (2019—2020)



红色线为三倍中误差界限

图 5 邻轨解算结果间的一致性分布对比

Fig. 5 Comparison of consistency distribution between adjacent track processing results

形变做过多阐述和分析。

## 2.2 形变时空发育特征

在上述形变监测及其整体面域分析的基础上, 我

们从 91 卫图助手软件收集了黑河流域的高分辨率光学遥感和实地调查等数据。通过综合分析, 该流域形变量级较大的区域主要与农业种植和矿产开采等人类活动高度相关。黑河流域形变量级和范围较大的区域主要有 6 处(图 4 中 A—F, 图 6 中洋红色虚线范围内所示): 嘉峪关市西北部(A, 最大形变量级超过  $-30 \text{ mm/a}$ )、酒泉市东南部(B, 最大形变量级超过  $-50 \text{ mm/a}$ )、武威市东南部(C, 最大形变量级超过  $-30 \text{ mm/a}$ )、金昌市金川国家矿产公园的露天开采矿坑区附近(E, 最大形变量级超过  $-50 \text{ mm/a}$ )和东南/北部的农耕区(D、E, 最大形变量级达到  $-20 \text{ mm/a}$ )以及位于张掖市山丹县老军乡的花草滩煤矿和东水泉煤矿(F, 最大形变量级超过  $-20 \text{ mm/a}$ )。图 6 依次展示了这些区域对应的地表形变和高分辨率光学遥感影像。

为了对主要形变区域的时序特征进行分析, 我们分别在形变明显的区域随机选取了部分特征示例点(见图 6), 并绘制出这些点的时序形变(见图 7)。可以看出, P1、P2、P4、P5、P6 点位于农业种植区, 其地表时序形变与季节存在显著的相关性。在监测时间范围内的春夏季, 地表存在显著下沉, 沿 LOS 向

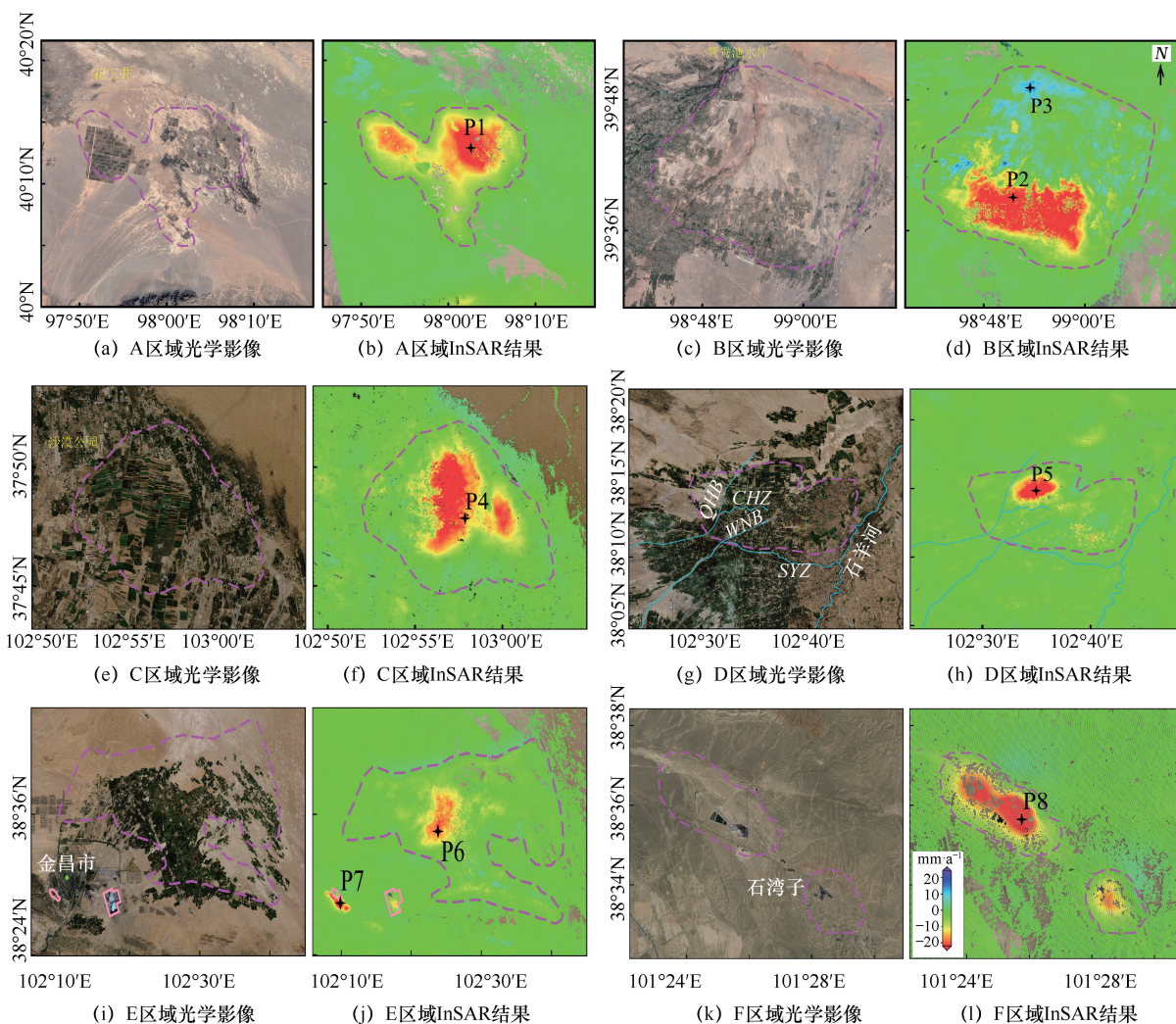


图 6 研究区域内的主要形变区 A—F 的 InSAR 结果与对应的光学影像

Fig. 6 InSAR results and corresponding optical images of major deformation zones A-F in the study area

最大形变量超过  $-70\text{ mm}$ ；夏末秋初，地表形变趋于减缓，并在秋冬季稳定或出现抬升，沿 LOS 向最大抬升量超过  $60\text{ mm}$  (如点 P1 处)。P3 位于戈壁区，该点附近存在普遍的地表抬升现象。从该点的时序形变可以看出，与该抬升区域南部沉降区的时序形变不同，其地表在每年的 9 月至次年 3 月呈现地表的持续抬升，而在其他时间段地表趋于稳定。P3 点处沿 LOS 向的抬升速率约为  $13\text{ mm/a}$ 。P7 和 P8 点均位于矿山开采沉陷区。P7 点位于金昌市金川国家矿山公园东南部，在该点附近存在较大范围的开采沉陷区。此外，在 P7 点东部约  $10\text{ km}$  处存在一处露天尾矿坝，如图 6(i)—图 6(j) 中粉色线所示。该尾矿坝内东南部也存在局部形变速率超过  $-10\text{ mm/a}$  的沉降现象。P8 点位于花草滩煤矿开采区上方地表。在该矿区东南约  $5\text{ km}$  处是东水泉煤矿，其上方地表同样存在地面下沉现象。与农业种植区的地面沉降特征不同的

是，P7、P8 点在时序上均呈现持续下沉趋势，且无明显的周期性。P7 点处的形变速率达到  $-56\text{ mm/a}$ ，P8 点处的形变速率达到  $-25\text{ mm/a}$ 。

### 3 广域形变发育驱动因素分析与生态响应

根据形变诱发机制和形变区地质、水文、人类活动、光学遥感等进行综合分析，黑河流域主要形变大体上可以分为三类：(1) 农业灌溉抽取地下水导致的地表季节性形变；(2) 季节性降水相关的盐碱地区地面抬升；(3) 矿区开采相关的地表沉降。下面将据此依次对形变的驱动因素及其生态响应进行综合分析。

#### 3.1 农业灌溉抽取地下水导致的地表季节性形变

黑河流域是一个以水循环为纽带驱动的独特生态系统。该流域内的人类生产生活与地表径流和地下水分布与补给等在空间上高度相关。在地表径流分布较密集的区域 (如黑河流域上中游) 的水资源分布较丰

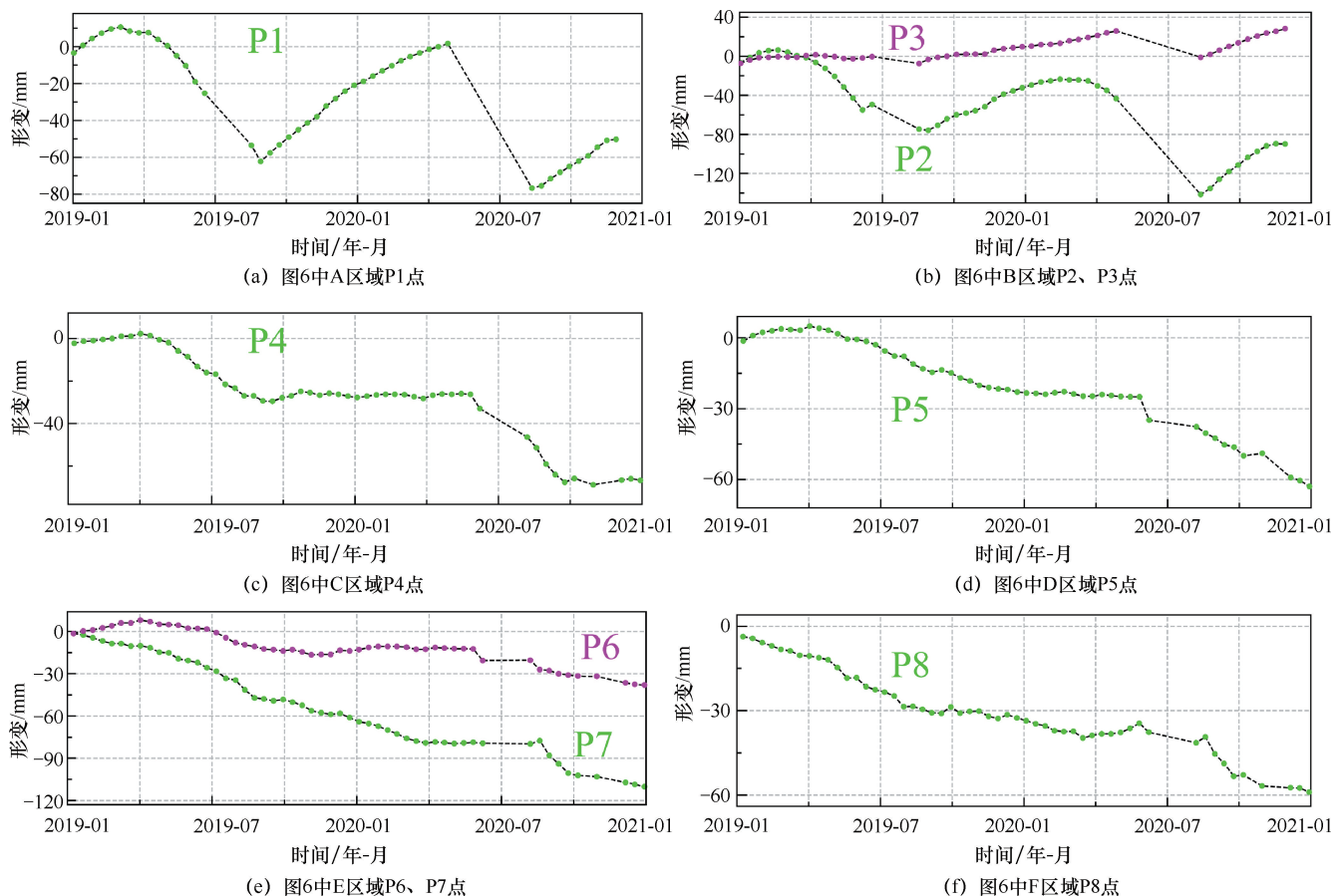


图 7 特征点时序累积形变

Fig. 7 Time-series cumulative deformation of characteristic points

富。黑河流域内输水渠道主要分为：干渠、支渠、斗渠和农渠。由于“黑节工程”“引水口门改造工程”等黑河分水政策性调水工程的实施<sup>[34]</sup>，黑河流域上中游的地表径流分配量减少，使得大部分种植区的农业灌溉类型成为同时利用地表径流和地下水的联合灌溉。与此同时，这些区域的水源（尤其是地下水）补充来源也更为丰富和多元化，包括祁连山冰雪融水、地表径流及其下渗、农业灌溉下渗等，使得补水速率较快。因此，这些区域虽然分布有大量的农业种植区，但是地表总体上较为稳定，水文生态较为健康，地下水超采导致的含水层非弹性形变信号很弱。

相较于水源充足的地表径流覆盖区域，远离地表径流、主要依靠干/支/斗/农渠等进行引水的农业种植区，其农业灌溉用水很大比例上依赖于地下水抽取。图 4 监测结果中形变量级和范围较大的农业种植区全部位于缺水型灌溉农业区[见图 6(a)—图 6(j)]。以形变区域 D 为例[见图 6(g)—图 6(h)]，在形变区域东南部约 13 km 处分布有一条由西南至东北方向输水的主河道—石羊河。在形变区域南部乌牛

坝干渠(WNB)和有一条由西向东输水并汇入石羊河的地表径流(SYZ)；西部有清河坝干渠(QHB)，由西南向东北输水。QHB 在金武高速(G3017)东部进行分水，部分水源汇入长胡子河(CHZ)。CHZ 由西向东进行输水。从当地的地表水源通道可以看出，这些地表主要输水线路在流入形变区域后，在输水线路及其附近区域虽然分布有较密集的农田，但其附近地表却较为稳定，形变速率较小。然而，在远离地表径流的区域，尤其是 P5 点及其附近，存在明显的大面积沉降漏斗。对于大面积的灌溉型农业种植区，只有从远处干渠调配经支/斗/农渠汇入的地表径流量是不能满足当地巨大农业生产生活的用水需求的。结合地表径流的空间分布，在缺乏较大流量的地表水补给的区域，其旱作农业的灌溉用水将主要依赖于地下水抽取，且含水层的补给来源不足，将不可避免地破坏当地承压含水层原始应力平衡，导致与农业灌溉和地下水开采周期高度一致的地面沉降。因此，水源丰度和用水需求对内陆型绿洲区含水层的健康和生态稳定起到决定性作用。

### 3.2 季节性降水相关的盐碱地区地面抬升

在 InSAR 监测结果(见图 4)中, 位于酒泉市肃州区东部的 B 区域不仅南部存在大范围的沉降, 而且在沉降区北部约 17 km 范围内存在较大面积的地面抬升[见图 6(c)—图 6(d)]。结合形变区域光学影像, 我们发现, 地面抬升区地表盖层主要为裸土戈壁。该区域地表虽然分布有地表径流, 但在径流附近却分布有大面积的盐碱地, 土地盐渍化严重, 使得农业在该区域很难发展<sup>[32]</sup>。因此, 从当地的时序形变中也可以看出, 在地下水开采较为严重的季节, 该地区地表趋于稳定。而在 9 月及之后的雨水充沛期, 由于该地区地势较低, 水源补充较多, 在径流/地下水的补充下地表发生明显的抬升。我们推断, 发生这一现象的主要原因是这一地区地壳表层分布有大量盐碱性土层的地质特征。该地质特征的形成可能与当地地下水位较高, 矿化度较大, 容易积盐有关。碱化度较高的盐碱地造成当地植被很难生长, 人类活动强度也较弱, 使得对地表/地下水的开采利用量很小, 而补充量却较大, 加上地下水位偏高和土壤结构破坏, 导致了地面的季节性抬升现象。

图 8 中黑色方框处分布有三个村庄, 在村庄及其周边分布有密集的农业种植区[见图 8(c)]。然而, 该地区地表水源却较为匮乏。远离地表河道和农业生产生活对淡水的需求可能促使当地农业生产生活对地下水的高度依赖性, 使得该区域出现与周边盐碱地的地面普遍抬升截然不同的地表明显下沉。进一步推断造成该区域地表发生局部沉降的主要原因是地下水超采引发的地面沉降与周边盐碱地地面抬升耦合的结果, 且地下水超采现象占主导。结合该区域的光学影像和土地利用现状, 以及这些村庄的地面沉降现象与其周边的大范围抬升区域之间鲜明的对比, 可以间接反映该地区目前的土地利用和地表形变的现状并验证 InSAR 监测结果的可靠性。

### 3.3 矿区开采相关的地表沉降

张掖市矿产资源种类丰富, 储量较大, 其中煤储量 7.6 亿 t, 铁储量 8.2 亿 t, 芒硝储量 3 386.6 万 t<sup>[42]</sup>。张掖市山丹县做出的 2020 年煤炭开采总量预期目标是 465 万 t。而位于该县境内的花草滩煤矿的年设计生产规模由 90 万 t 提升至 300 万 t, 东水泉煤矿 75 万 t。可见, 花草滩煤矿和东水泉煤矿是该县煤炭生产的主力矿井, 且在 InSAR 监测时间段内的煤炭开采产能正在加大<sup>[43]</sup>。

从 InSAR 监测结果可以看出, 近年来随着矿井产能的提升, 这两个矿井因地下煤炭开采导致的地面

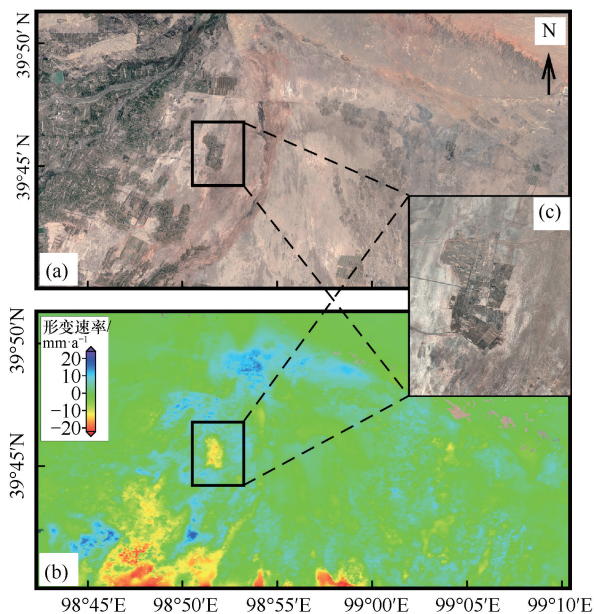


图 8 酒泉市肃州区东部地表抬升区光学影像与形变结果  
Fig. 8 Optical image and deformation results of surface uplift area in eastern Suzhou District, Jiuquan City

沉降现象日益显著。与农业区明显的季节性沉降/抬升不同, 这些沉降在时间维度上呈现出与地下开采活动相关的持续性、非线性特征。花草滩煤矿开采导致的沿 LOS 向最大形变速率超过  $-25$  mm/a, 东水泉煤矿开采导致的最大形变速率达到  $-12$  mm/a。结合两个矿井的开采信息, 可以看出, 最大形变速率和地面沉降范围的不同与两个矿井的年开采产能呈明显的正相关[见图 6(k)—图 6(l)]。然而, 由于缺乏矿井的实际地质参数和具体的工作面开采信息, 我们暂时无法对矿井开采沉降做进一步的定量分析和参数反演。虽然如此, 本研究成果可为当地矿产资源开采与地表稳定性相关的生态环境调研及政府管理提供参考。

## 4 结论

本研究通过构建 2019—2020 年 Sentinel-1 卫星影像时序数据集, 采用改进型 IPTA-InSAR 地表广域形变测量技术与高分辨率光学遥感数据实现了黑河流域地表形变的毫米级监测与分析。研究表明, 黑河流域地表形变具有显著的空间异质性: 6 处显著形变区集中分布于绿洲农业带、盐碱戈壁区及矿产开发区, 并揭示了农业灌溉驱动型形变、水文地质响应型形变和采矿活动诱发型形变三类主导形变机制。

本研究系统揭示了黑河流域自然和人类活动驱动的地表形变时空规律, 为流域水资源优化配置、矿区生态修复及农业灌溉模式调整提供了科学依据。未来需结合地质学、土壤学和地面监测数据等对黑河流域

开展精细化跨学科交叉监测反演研究, 并建立多源数据融合的形变预测和生态综合评价模型, 以支撑西北内陆河流域人地系统的可持续发展。

## 参考文献 (References):

[1] 李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.

LI X, MA M G, WANG J, et al. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914.

[2] CHE T, LI X, LIU S M, et al. Integrated hydrometeorological, snow and frozen-ground observations in the alpine region of the Heihe River Basin, China[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(3): 1483-1499.

[3] DU E H, TIAN Y, CAI X M, et al. Exploring spatial heterogeneity and temporal dynamics of human-hydrological interactions in large river basins with intensive agriculture: A tightly coupled, fully integrated modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125313.

[4] HAN F, ZHENG Y, TIAN Y, et al. Accounting for field-scale heterogeneity in the ecohydrological modeling of large arid river basins: Strategies and relevance[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 126045.

[5] KANG J, JIN R, LI X, et al. Mapping high spatiotemporal-resolution soil moisture by upscaling sparse ground-based observations using a Bayesian linear regression method for comparison with microwave remotely sensed soil moisture products[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 228.

[6] RUEHR S, LEE X H, SMITH R, et al. A mechanistic investigation of the oasis effect in the Zhangye cropland in semiarid western China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2020, 176: 104120.

[7] WANG H B, LI X, XIAO J F, et al. Carbon fluxes across alpine, oasis, and desert ecosystems in northwestern China: The importance of water availability[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 697: 133978.

[8] 李新, 晋锐, 刘绍民, 等. 黑河遥感试验中尺度上推研究的进展与前瞻[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 921-932.

LI X, JIN R, LIU S M, et al. Upscaling research in HiWATER: Progress and prospects[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 921-932.

[9] 李新, 李小文, 李增元, 等. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 637-649.

LI X, LI X W, LI Z Y, et al. Progresses on the watershed allied telemetry experimental research (WATER) [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(5): 637-649.

[10] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *中国水利*, 2023(2): 1-10.

LI G Y. Implementing the agenda of the 20th CPC National Congress and boosting high-quality water development in the new stage: The speech at 2023 National Working Conference on Water Resources[J]. *China Water Resources*, 2023(2): 1-10.

[11] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(1): 1-10.

LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.

[12] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364(6433): 138-142.

[13] MA Z F, ZENG H Y, LUO H P, et al. Slow rupture in a fluid-rich fault zone initiated the 2024  $M_w$  7.5 Noto earthquake[J]. *Science*, 2024, 385(6711): 866-871.

[14] XU W B, XIE L, AOKI Y, et al. Volcano-wide deformation after the 2017 erta ale dike intrusion, Ethiopia, observed with radar interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8): e2020JB019562.

[15] WANG J H, LU Z, BEKAERT D, et al. Along-arc volcanism in the western and central aleutian from 2015 to 2021 revealed by cloud-based InSAR processing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(23): e2023GL106323.

[16] MA P F, LIN H, WANG W X, et al. Toward Fine Surveillance: A review of multitemporal interferometric synthetic aperture radar for infrastructure health monitoring [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2022, 10(1): 207-230.

[17] 冯光财, 李志伟. 基于雷达干涉测量技术的珠三角地形和形变监测[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2019.

FENG G C, LI Z W. *InSAR Technology and Its Application in Topography Mapping and Deformation Monitoring over the Pearl River Delta*[M]. Changsha: Central South University Press, 2019.

[18] WANG Y D, YANG Z F, LI Z W, et al. Fusing adjacent-track InSAR datasets to densify the temporal resolution of time-series 3-D displacement estimation over mining areas with a prior deformation model and a generalized weighting least-squares method[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(5): 47.

[19] YANG Z F, LI Z W, ZHU J J, et al. Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter inversion, and forward predictions: A review [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(1): 71-90.

- [20] 朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR 滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2001-2019.
- ZHU J J, HU J, LI Z W, et al. Recent progress in landslide monitoring with InSAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2001-2019.
- [21] XIONG Z Q, ZHANG M Z, MA J, et al. InSAR-based landslide detection method with the assistance of C-index [J]. *Landslides*, 2023, 20(12): 2709-2723.
- [22] 王海艳, 冯光财, 苗露, 等. InSAR 视角下准噶尔盆地农业灌溉区地表形变特征和演化规律[J]. 遥感学报, 2020, 24(10): 1233-1242.
- WANG H Y, FENG G C, MIAO L, et al. The characteristics and evolution of surface deformation induced by agricultural irrigation in the Junggar Basin from the perspective of InSAR [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(10): 1233-1242.
- [23] WANG Y D, FENG G C, LI Z W, et al. Estimating the long-term deformation and permanent loss of aquifer in the southern Junggar Basin, China, using InSAR[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 614: 128604.
- [24] 江利明, 邵益, 周志伟, 等. 智能化 InSAR 数据处理研究进展、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2024, 53(6): 1037-1056.
- JIANG L M, SHAO Y, ZHOU Z W, et al. A review of intelligent InSAR data processing: Recent advancements, challenges and prospects[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(6): 1037-1056.
- [25] 王跃东. 广域 InSAR 形变监测方法研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- WANG Y D. Research and Application of the Methods for Wide Area InSAR Deformation Monitoring [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [26] WANG Y D, FENG G C, LI Z W, et al. A multi-frame deformation velocity splicing method for wide-area InSAR measurement based on uncontrolled block adjustment: A case study of long-term deformation monitoring in Guangdong, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 301: 113929.
- [27] 张其兵, 康世昌, 王晶. 2000—2014 年祁连山西段老虎沟 12 号冰川高程变化[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 733-740.
- ZHANG Q B, KANG S C, WANG J. Elevation change of the laohugou glacier No. 12 in the western Qilian Mountains from 2000 to 2014[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 733-740.
- [28] CHEN J, LIU L, ZHANG T J, et al. Using persistent scatterer interferometry to map and quantify permafrost thaw subsidence: A case study of eboling mountain on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(10): 2663-2676.
- [29] 陈玉兴, 江利明, 梁林林, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的黑河上游冻土形变时序 InSAR 监测[J]. 地球物理学报, 2019, 62(7): 2441-2454.
- CHEN Y X, JIANG L M, LIANG L L, et al. Monitoring permafrost deformation in the upstream Heihe River, Qilian Mountain by using multi-temporal Sentinel-1 InSAR dataset [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(7): 2441-2454.
- [30] PENG S J, PENG X Q, FRAUENFELD O W, et al. Using InSAR for surface deformation monitoring and active layer thickness retrieval in the Heihe River Basin on the northeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, 128(4): e2022JF006782.
- [31] 杨旺, 何毅, 张立峰, 等. 甘肃金川矿区地表三维形变 InSAR 监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 177-188.
- YANG W, HE Y, ZHANG L F, et al. InSAR monitoring of 3D surface deformation in Jinchuan mining area, Gansu Province [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(1): 177-188.
- [32] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.
- WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(12): 1-8.
- [33] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.
- LI X, GOU X H, WANG N L, et al. Qilian Mountains' green development: From ecological governance to ecological restoration [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2928-2937.
- [34] 盖迎春, 李新, 田伟, 等. 黑河流域中游人工水循环系统在分水前后的变化[J]. 地球科学进展, 2014, 29(2): 285-294.
- GE Y C, LI X, TIAN W, et al. The impacts of water delivery on artificial hydrological circulation system of the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(2): 285-294.
- [35] 乔雪梅, 刘普幸, 任媛, 等. 基于遥感的黑河流域生态环境变化特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3962-3971.
- QIAO X M, LIU P X, REN Y, et al. Analysis of the characteristics and driving factors of ecological environment changes in Heihe river basin based on remote sensing data [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(9): 3962-3971.
- [36] XU B, LI Z W, ZHU Y, et al. Kinematic coregistration of sentinel-1 TOPSAR images based on sequential least squares adjustment [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 3083-3093.
- [37] XIONG Z Q, FENG G C, FENG Z X, et al. Pre-and post-failure spatial-temporal deformation pattern of the Baige landslide retrieved from multiple radar and optical satellite images [J]. *Engineering Geology*, 2020, 279: 105880.
- [38] WANG Y D, FENG G C, LI Z W, et al. Retrieving the

- displacements of the Hutubi (China) underground gas storage during 2003—2020 from multi-track InSAR [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 268: 112768.
- [39] 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 and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [40] WERNER C, U. WEGMULLER, T. STROZZI, A. WIESMANN. Gamma SAR and interferometric processing software [J]. In: *Proceedings of the Ers-envisat Symposium*, Gothenburg, Sweden, 2000, 461: 211-219.
- [41] DONG J, ZHANG L, LIAO M S, et al. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111370.
- [42] 张掖市人民政府办公室. 张掖市矿产资源总体规划(2008—2015年)[Z]. 张掖: 张掖市人民政府办公室, 2010.
- Office of the People's Government of Zhangye City. *Master Plan of Mineral Resources in Zhangye City (2008—2015)* [Z]. Zhangye: Office of the People's Government of Zhangye City, 2010.
- [43] 山丹县人民政府. 山丹县矿产资源总体规划(2016—2020年)[Z]. 张掖市: 山丹县人民政府, 2018.
- The People's Government of Shandan County. *Master Plan of Mineral Resources of Shandan County (2016—2020)* [Z]. Zhangye: The People's Government of Shandan County, 2018.

(责任编辑 王海锋)