

引用格式: Li Shirao, Zhang Bo, Liu Guoxiang, *et al.* Earth Fissures and Land Subsidence in Xi'an from NPSI Monitoring and Analysis[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 857-864. [李诗尧, 张波, 刘国祥, 等. 基于NPSI方法的西安市地裂缝灾害链地表形变监测与演化态势分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 857-864.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.4.0857

基于NPSI方法的西安市地裂缝灾害链地表形变 监测与演化态势分析

李诗尧¹, 张波¹, 刘国祥^{1,2}, 沙永莲¹, 王敏¹, 王晓文^{1,2}, 张瑞^{1,2}

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

2. 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 611756)

摘要: 受构造背景、地下水采掘、活断层等因素的综合作用, 西安市地裂缝于近年间不断加剧, 引发多处不均匀地表沉降, 并演化为对地表及地下建筑物均有强烈破坏作用的城市地质灾害链。为探明西安市地裂缝灾害链区域近年间的地表沉降态势、辨析不均匀沉降与地裂缝发育的联系, 引入在城市地表形变监测精度和可靠性方面具有显著优势的网络化永久散射体时序雷达干涉测量(NPSI)方法, 以2017年3月至2018年3月间成像的15期Sentinel-1A卫星SAR影像为数据源针对西安地区开展了时序监测分析, 结合水准测量数据验证发现NPSI监测结果的精度达到 ± 4.75 mm。实验结果表明: 西安市地裂缝正向西南郊发育, 地下水采掘及地上地下工程的建设在地裂缝发育趋势下加剧了不均匀沉降灾害, 在形成地裂缝灾害链的鱼化寨、电子城、曲江新区以及地铁3号线等危害严重区域需要实时监测地裂缝发育趋势, 并合理规划地下水开采及工程建设活动。相关研究结果可为路政、城建等部门的业务工作及研究提供参考信息。

关键词: 西安市; 地裂缝; NPSI; Sentinel-1A; 地表形变

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)04-0857-08

1 引言

西安市地处临潼—长安断裂带, 其为渭河盆地北东向的铲状正断层, 错断中心位于西安市东南郊, 在新构造时期以来受北西—南东拉伸应力下诱导生成一系列次级断裂, 终于上世纪中叶在主城区范围内形成14条呈北东 70° 左右、带状分布的地裂缝, 延伸长度达100 km, 覆盖面积 250 km^2 。近40 a间, 随着城市规模和人口密度的提升, 在地下水长期大规模采掘、地上地下工程持续建设等人为因素的影响下进一步发展加剧, 引发显著的区域性不均匀沉降, 并演化为对地表及地下建筑物均有强烈破

坏作用的城市地质灾害链, 对西安市人民的生命和财产安全带来极大隐患, 严重制约了城市建设发展。目前, 西安市地裂缝—沉降典型的地质灾害已受到减灾、交通、城建以及环保等相关主管部门的关注, 赵超英等^[1-3]学者已开展了大量相关研究, 获取了较为系统的基础研究数据。然而, 针对地裂缝灾害链所涉及的年际监测与演化态势分析成果尚不多见; 及时获取相关研究数据, 可为相关政策的制定和后续研究工作的展开提供重要的参考。

2000年以来, 随着雷达传感器技术的革新和多种卫星系统投入运营, 星载合成孔径雷达干涉技术

收稿日期: 2020-01-14; 修订日期: 2021-05-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771402), 国家自然科学基金青年基金(41804009), 四川省科技计划面上项目(2018JY0564)。

作者简介: 李诗尧(1995—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事微波遥感与合成孔径雷达干涉研究。E-mail: LSR@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 张瑞(1982—), 男, 河南遂平人, 博士, 副教授, 主要从事微波遥感与合成孔径雷达干涉研究。E-mail: zhangrui@swjtu.edu.cn

(Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR) 获得长足发展。相较于传统的水准测量、GNSS测量等手段, InSAR技术因其高时空分辨率、高精度、全天候等技术优势, 在重大工程和城市地表形变监测领域逐步显示出巨大的应用潜力^[4-5]。期间, 国内外学者提出了一系列时序建模理论与方法, 如Ferretti等^[6-7]提出永久散射体雷达干涉法(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PSInSARTM)、Berardino等提出的短基线集技术(Small Baseline Subset, SBAS)^[8]、Hooper等^[9]提出的PSI、Werner等^[10-11]提出的点目标分析法(Interferometric Point Target Analysis, IPTA)以及新近出现的SqueeSAR^[12]等, 在系统建模基础上削弱大气效应、轨道误差和高斯噪声等负面影响, 进一步提升了其面向城市地表形变的监测能力与精度水平。其中, 刘国祥等^[13]于2006年提出了网络化永久散射体时序雷达干涉测量(Networked Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, NPSI)方法, 基于PS自由构网并进行解算与信息分离的方法, 并在美国菲尼克斯市、中国天津等地开展了实验, 实验结果表明该算法极其适用于城市地表形变的长时序监测分析, 在空间覆盖率、可靠性和精度方面较现有算法优势明显^[14-15]。针对西安市地裂缝灾害链引发地表形变较为复杂的现实情况, 引入NPSI方法获取年际地表形变监测数据, 以便针对地裂缝灾害链开展更为客观、深入的现状与演化态势分析。

目前对于西安地质灾害的研究多针对地裂缝或地面沉降单方面的监测, 对于两者综合形成的灾害链区域的成因、危害及演化趋势多处于定性研究的阶段。为了探索和归纳不均匀沉降与地裂缝发育的联系及时空演化规律, 采用空间监测精度更高细节更丰富的NPSI技术, 以西安主城区位于地裂缝周边的8个区1119 km²范围内的区域为研究对象, 以24 d稳定间隔的Sentinel-1A卫星SAR影像为数据源获取时序地表形变监测数据集, 并辅以地面水准数据实施精度验证。在此基础上, 结合地质背景资料和实地调研数据等, 重点划定危害严重区域及敏感区段。

2 理论基础与形变解算方法

2.1 总体技术路线

为减弱大气延迟干扰提高形变信号提取精度,

刘国祥等提出相邻永久散射体(Persistent Scatterer, PS)点的自由连接法(Freely Connected Network, FCN)构建PS自由网, 利用同一幅影像区域内相邻目标的大气状态相似性, 从空间尺度对相邻PS点的差分干涉相位再次差分, 计算PS网络中每条基线的相关参数, 从而解算地表形变速率^[16], 其技术路线如图1所示。与现有的其他时序干涉模型相比, 该方法建立在FCN网络构建的大量冗余弧段观测量的基础之上, 通过最小二乘平差解算提取各PS点的线性形变, 能够有效提升形变速率分析的精度水平, 尤其适用于建筑物与构筑物密集的城市区域。

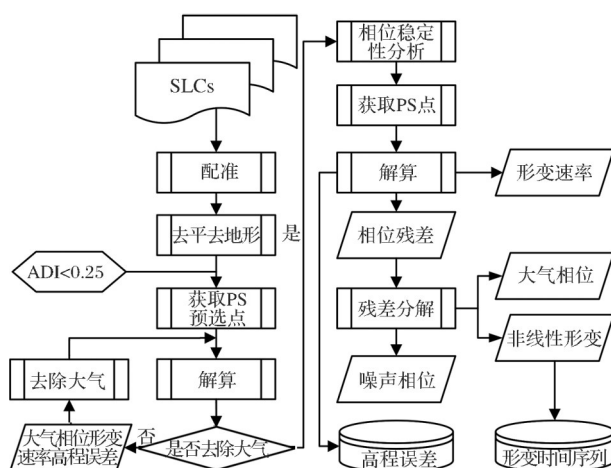


图1 技术路线

Fig.1 Technical route

2.2 PS点选取与相位差分模型

PSI技术以振幅离差法筛选出时序SAR影像中相位稳定、信噪比高的PS点, 假设有 $N+1$ 幅覆盖相同区域的SAR影像, 从时序SAR影像中提取PS目标并获得 M 幅时序差分干涉图, 差分相位中包含LOS方向形变速率、DEM引起的高程误差、大气相位等。

此时第 i 个差分干涉对、第 x 个像素的残余相位 $\phi_{x,i}$ 由以下几部分组成:

$$\phi_{x,i} = \frac{4\pi}{\lambda \cdot R \cdot \sin\theta} \cdot B_i^\perp \cdot \phi_e + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot v_x + \phi_{x,i}^{res} \quad (1)$$

其中: λ 、 R 、 θ 分别为雷达波长、传感器至目标的距离及雷达入射角; B_i^\perp 、 T_i 分别为垂直基线、时间基线长度; ϕ_e 为DEM误差引起的残余地形相位; v_x 为雷达视线向(LOS)线性形变速率; $\phi_{x,i}^{res}$ 为残余相位。残余相位 $\phi_{x,i}^{res}$ 由非线性形变相位 $\phi_{x,i}^{nldf}$ 、大气延迟相位 $\phi_{x,i}^{atm}$ 及噪声相位 $\phi_{x,i}^{noi}$ 构成, 如式(2)所示。

$$\phi_{x,i}^{res} = \phi_{x,i}^{nldf} + \phi_{x,i}^{atm} + \phi_{x,i}^{noi} \quad (2)$$

2.3 PS网络构建及线性形变估计

与不规则三角形网络(Triangular Irregular Network, TIN)相比,FCN方法相邻PS点间任意连接所获得的观测基线数量更多,通过增加冗余观测量来提高平差精度,且能保留更多PS点,形变监测结果具有更详细的空间分布信息^[17]。为减弱大气延迟相位影响,通过设置的欧几里德距离阈值,对任意两点自由连接生成的基线进行筛选,选取小于该阈值的基线参与构网,如式(3)所示。

$$S(x_p, y_p; x_q, y_q) = \sqrt{[f_r \cdot (x_q - x_p)]^2 + [f_a \cdot (y_q - y_p)]^2} \leq S_0 \quad (3)$$

其中: x, y 为像素的像空间坐标; f_r 和 f_a 分别为距离向和方位向像空间距离转换为地面几何距离的比例因子; S_0 为距离阈值,根据空间域内的大气变化梯度确定,一般可设置为1 km。

采用式(4)参数 γ 优化模型判断PS网络中的基线质量,当 γ 达到最大化时所得的模型最优解(Δv , $\Delta \varepsilon$),即为PS目标的形变速率差与高程修正差。

$$\gamma = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\cos \Delta \omega_i + j \sin \Delta \omega_i) \right| = \max \quad (4)$$

其中: γ 为基线模型相关系数; $j = \sqrt{-1}$; $\Delta \omega_i$ 表示观测值与拟合值之差,即:

$$\Delta \omega_i = \Delta \phi_i - \frac{4\pi}{\lambda \cdot \bar{R} \cdot \sin \bar{\theta}} \cdot \bar{B}_i^\perp \cdot \Delta \varepsilon - \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot \Delta v \quad (5)$$

其中: \bar{B}_i^\perp 、 \bar{R} 和 $\bar{\theta}$ 为两PS点对应参数的平均值; $\Delta \varepsilon$ 和 Δv 分别是两PS点间的高程误差增量和形变速率增量。

通过设定模型相关系数的阈值对PS网络中基线质量进行判断,删除不满足条件的基线以及由此产生的孤立PS点,此时PS基线网中仍存在大量的多余观测值,采用最小二乘平差法解算可得到各PS目标的高程改正的最或然值和线性形变速率。

2.4 非线性形变参数估计

从PS点差分相位中分离出高程误差改正值和线性形变速率后,残余相位如式(2)所示,其中非线性形变相位和大气延迟相位在空间域中表现出低频特性,噪声相位表现为高频特性,对残余相位进行低通滤波后可从残余相位中分离出噪声相位,再通过相位的时序变化曲线分离出大气延迟相位从而获得非线性形变相位。非线性形变与线性形变相位之和为完整的地表相位,即:

$$\phi_{\text{def}} = \phi_l + \phi_{nl} \quad (6)$$

3 研究区域与数据源

3.1 研究区域概况

选择陕西省西安市作为典型研究区域,如图2(a)所示,西安市位于 $108.63^\circ \sim 109.17^\circ \text{ E}$ 、 $34.05^\circ \sim 34.45^\circ \text{ N}$,面积约为 $1\,119 \text{ km}^2$ 。西安地处陕西关中平原中部,地势平坦,平均海拔约为600 m;气候方面,西安属于暖温带半湿润大陆性季风气候,市区年平均气温 13.3° C ,1月最低平均气温 -0.9° C ,7月最高平均气温 26.4° C ,年降水量 $558 \sim 750 \text{ mm}$,且主要集中在夏季。

西安市是我国地裂缝分布最密集的城市之一,自1959年发现地裂缝现象以来,已经历了3次周期性的活动高潮期。城区内分布有14条地裂缝带($f_1 \sim f_{14}$),东至灞河,西到沣惠干渠,南至绕城高速路,北到井上村^[18],各地裂缝间基本平行且大致呈北东走向,与长安—临潼断裂带方向一致。每条地裂缝可延伸数公里,影响带宽度 $3 \sim 8 \text{ m}$,最大可达到 $10 \sim 30 \text{ m}$,其活动具有迁移性,根据多年的监测资料显示,位于东郊、南郊的地裂缝活动强度较大,西郊、北郊则相对较弱。

西安地裂缝形成原因复杂多样,长安—临潼断裂上盘因构造运动受到北西—南东向的拉张应力作用形成一系列次级小断裂,随着生活和工业的用水紧张,西安市大量开采地下水加剧了城市的沉降趋势,仅1972至1983年间西安市部分区域沉降量累计达到777 mm,局部地表的不均匀沉降导致岩土变形引发了地裂缝的产生,此外,承压水位的下降也激发了断层活动性,在受构造背景、地下水采掘以及活断层等因素的综合作用下,西安市地裂缝于近年间不断加剧。

近些年随着城市规模的扩展,尤其是曲江等区域的开发,在地下水禁采区域的南郊地带,随着用水量的激增地下水的开采致使城南区域的地表失稳逐渐加剧。张艳梅等^[19]使用InSAR技术探明西安市2015~2016年间大部分区域地表形变速率位于 $[-30, 30] \text{ mm/a}$ 区间,期间最大的累积形变出现在鱼化寨,达到75 mm。彭米米等^[20]利用2015~2017年Sentinel-1A数据开展西安的地表形变测量,也探明了电子城和东三爻村等另外几处正在发展中的地表失稳区域。

3.2 数据介绍

使用2017年3月至2018年3月(时间跨度1 a)期间获取的15景C波段的Sentinel-1A卫星SAR影

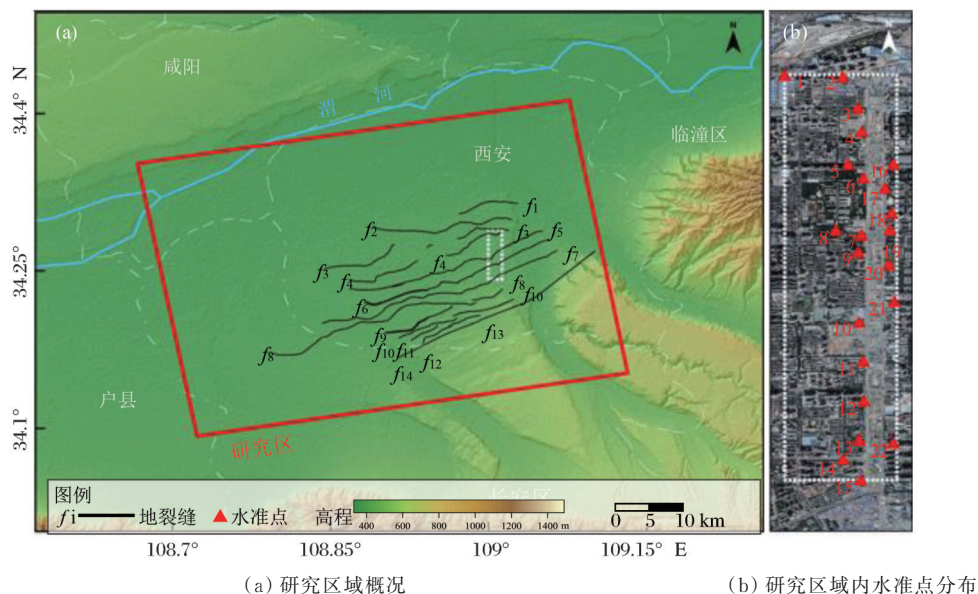


图 2 研究区位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the location of the study area

像,为VV极化升轨成像数据,影像斜距向和方位向的分辨率分别为2.33 m和13.97 m,重返周期12 d。为去除地形相位的影响本文选用下载自美国地质调查局的SRTM V4.1 30 m分辨的DEM(Digital Elevation Model)。

为降低时空失相关的影响,此次实验中使用130 d作为时间基线 T 的阈值,空间基线 B_p 的阈值设定为180 m,经基线组合和筛选后共形成32个干涉对,时空基线网型如图3所示。

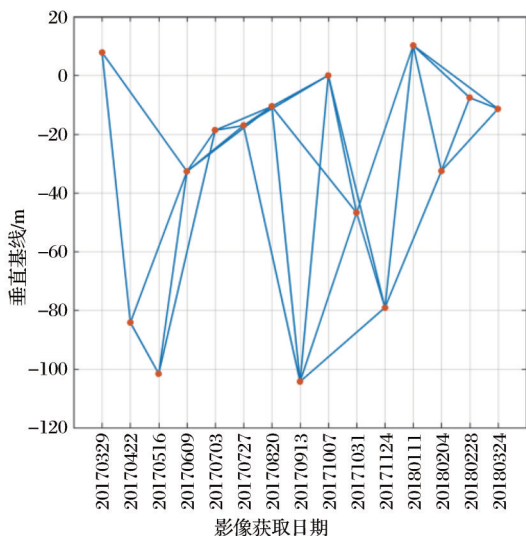


图 3 干涉对时空基线图

Fig.3 Interference space-time baselines

此外,在研究中选取了西安市内布设的22个水准点作为校验数据,分布于图2(a)中白色虚线框内,其点位及编号如图2(b)所示,该实验中选取了从

2017年8月23日至2018年3月25日的水准监测数据。

4 地面形变监测与空间分析

4.1 西安市2017~2018年形变监测

以2017年3月29日期SAR影像作为主影像,选取2018年3月24日SAR影像作为从影像进行差分干涉,基于DInSAR(Differential InSAR, DInSAR)方法对西安市地表形变开展总体排查,经过去除地形相位、大气相位,相位解缠及地理编码后,获得西安市地表形变结果如图4所示。从图4(a)中所示的差分干涉相位和图4(b)中形变值分布可知,在西安市存在3处较明显的形变区,穿过多条地裂缝带,分别位于西南郊的碑林区、雁塔区及长安区(如图4(c)所示),形变值在 $-0.11\sim 0.03$ m范围内。

为分离大气和轨道误差,进一步通过NPSI方法对以图3所示干涉对差分干涉和时序建模解算,选择几乎无形变的区域为参考区域(图5中的RP点

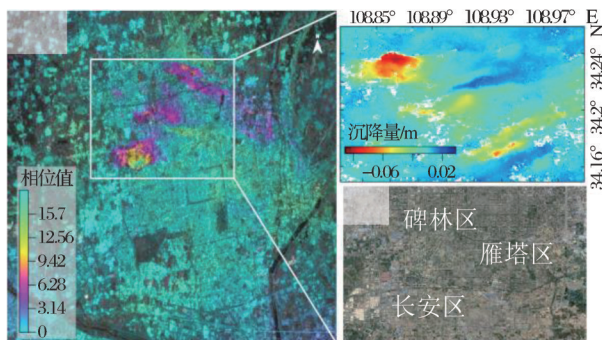


图 4 DInSAR形变监测结果

Fig.4 DInSAR deformation monitoring results

处)解算研究区垂直向形变速率,提取的2017~2018年西安市地表形变速率分布如图5所示。研究表明,在监测时间内,地裂缝活动强烈的西南郊地表形变量较大,由北向南依次分布呈漏斗状的

A形变区,面积 4.3 km^2 ,最大形变速率为 -100 mm/a ;东西走向条形的B形变区,长度 4.9 km ,最大形变速率为 -80 mm/a ;西南-东北走向的C形变区,长度 5.4 km ,最大形变速率为 -66 mm/a 。

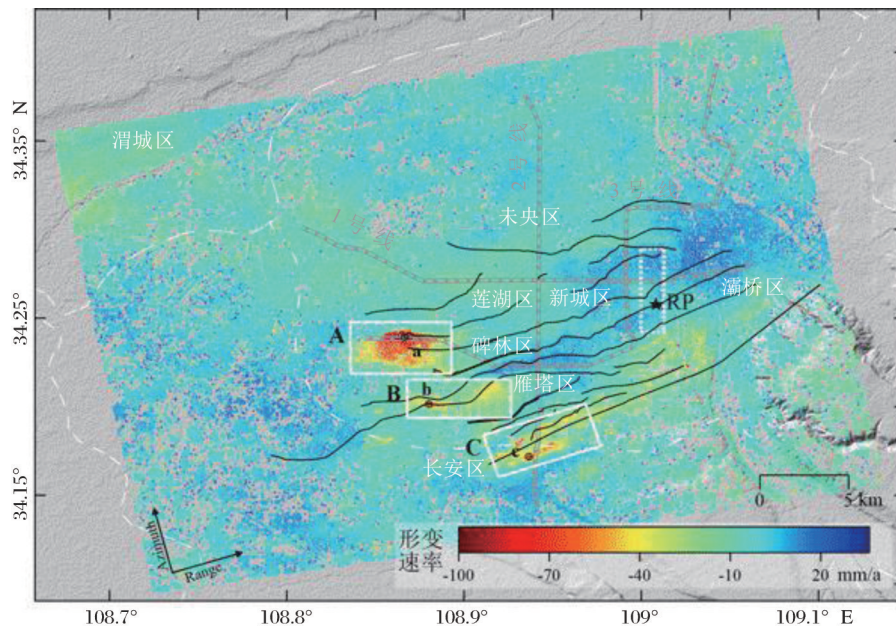


图5 研究区形变速率分布图

Fig.5 Deformation rate of the study area

为验证网络PSI解算结果的可靠性和精度,此次实验选取布设于研究区内的22个水准点作为检校点与网络PSI解算结果进行对比。图6显示了水准测量结果与NPSI解算结果的时序沉降分布,图中“+”代表水准监测结果,“○”代表NPSI监测结果,绿色曲线表示二者的差值,在214 d的时间跨度内,二者差值在 $[-5.14, 8.32]\text{ mm}$ 区间内,绝对值最大值为 8.32 mm ,最小值为 0.22 mm ,均值为 2.97 mm ,差异标准差为 $\pm 3.76\text{ mm}$,均方根误差为 $\pm 4.75\text{ mm}$ 。

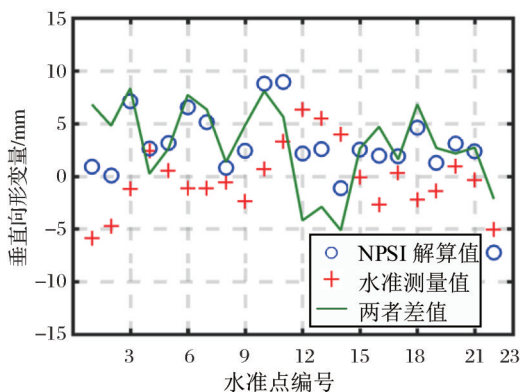


图6 水准监测结果和NPSI监测结果对比

Fig.6 Comparison of monitoring results of leveling and NPSI

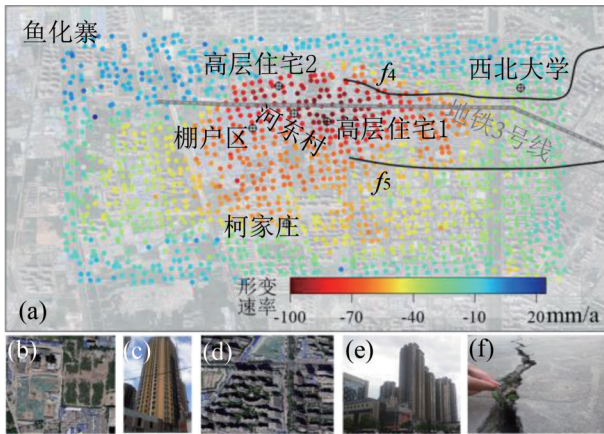
4.2 地裂缝发展态势分析

由图5分析可知,在空间格局上,西安市地裂缝的东段地表失稳渐趋缓和,但西南端有加剧的趋势。下面将针对3处正在发展中的区域做具体讨论。

鱼化寨形变区域内有西北大学—西光厂地裂缝带(f_4)、黄雁村—和平门地裂缝带(f_5),其中 f_4 地裂缝西段活动强烈导致该处的部分建筑物因遭受严重破坏而被拆除,道路也发生了严重变形;经课题组实地考察,位于 f_4 地裂缝西段的枫韵蓝湾小区内有多处地裂缝,深度达 15 cm ,宽度 8 cm ,且存在墙体开裂、地表拱起等现象。地质资料显示,西段所处地区的黄土湿陷等级为非自重湿陷I级,在西北大学附近的部分地区其湿陷等级达到III级自重湿陷,为强湿陷性场地,湿陷性的分布与该条地裂缝的活动强度有较强的对应关系。

位于 f_4 、 f_5 地裂缝之间的鱼化寨形变区呈漏斗状,与条状的B、C形变区相比形状不同且量级最大,如图7(a)所示,A区域内的沉降速率平均 -35 mm/a ,最大沉降速率达到 -99 mm/a 。有资料显示^[21-22],鱼化寨地区有深井45口,井深 $200\sim 220\text{ m}$,地下水开采量约 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,位于河东村、柯家庄的自备井截止2016年仍在使

水泵的强力抽水引起涌砂流砂,村民反映井周围地面下沉严重,两年内填砾石达 8 m^3 ;柯家庄自备井抽水时也有明显的出砂现象,砂磨叶轮声明显。通过对照该区域沉降中心2017年5月12日和2018年4月2日的光学影像,此处为人口、建筑物密集区域,沉降中心处的高层住宅区在 0.3 km^2 内分布多栋30层以上的高层建筑,如2014年竣工的天朗蓝湖树小区(图7(e)所示)、2011年竣工的风度天城、2011年竣工的左岸春天、2009年竣工的都市印象小区、2006年竣工的枫韵蓝湾小区等,图7(f)为枫韵蓝湾小区内的地裂缝。在研究期间,高层住宅区2正修建超高层建筑群,如图7(c)所示。形变漏斗中心与其临近区域的不均匀形变梯度可能加剧 f_4 、 f_5 地裂缝向东发育的趋势。



注:(a)A形变区地表形变;(b)高层住宅区2处2017年5月光学影像;(c)高层住宅区2;(d)高层住宅区1处2017年5月光学影像;(e)天朗蓝湖树小区;(f)地裂缝

图7 A区域(鱼化寨)地表形变及光学影像

Fig.7 Surface deformation and optical image of Area A (Yuhuzhai)

图8所示该区域内的地铁3号线形变量的纵向剖面图显示,延平门—鱼化寨路段受到不均匀形变影响,自西向东从保税区—延平门路段沿线地表形变量相对较小,但经过鱼化寨形变区的延平门—鱼化寨路段形变速率急剧增加,最大达到 -86 mm/a 。考虑到地表形变可能会导致地下结构的损伤进而威胁地铁的安全运营,该路段周边的 f_4 、 f_5 地裂缝活动性需要长期监测。

如图9(a)所示,电子城形变区(B沉降区)与小寨—铁炉庙地裂缝带(f_7)、大雁塔—北池头地裂缝带(f_8)在电子城沉降带走向一致,自电子城住宅区向西延伸至陕西省体育训练中心,沉降速率最大位于体育中心达到 -80 mm/a ,对比该区域2017年5月

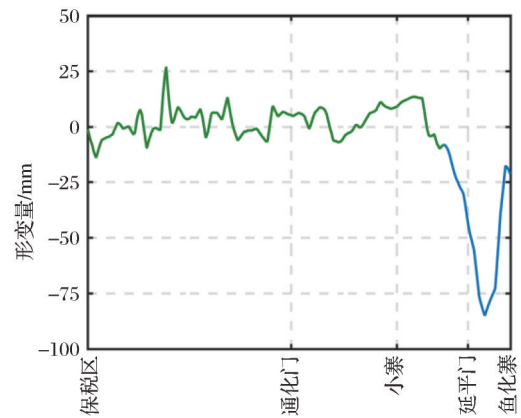
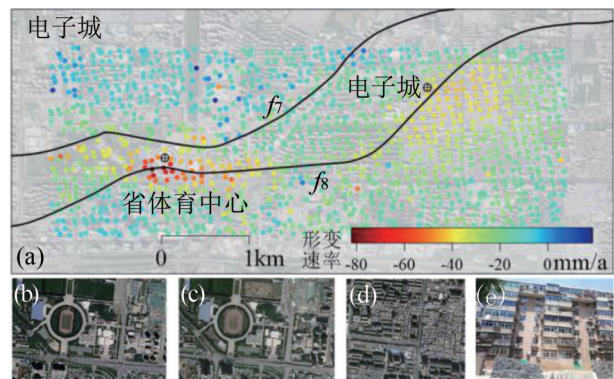


图8 地铁3号线形变量

Fig.8 Deformation of subway line 3

和2018年4月的光学卫星影像,如图9(b)和9(c)所示,在研究期间,位于该区域内的地铁6号线省体育馆站—丈八六路站正在施工建设,6号线与 f_8 地裂缝交汇处位于省体育中心。在电子城附近集中分布着西京电气总公司家属院、二零五社区、三十九所生活区、中国飞机强度研究所生活区等人口建筑物密集的住宅区(如图9(d)),形变速率在 $[-40, -50]\text{ mm/a}$ 范围内,经实地考察,此处的建筑物多为6层左右老旧的建筑物,如图9(e)所示。



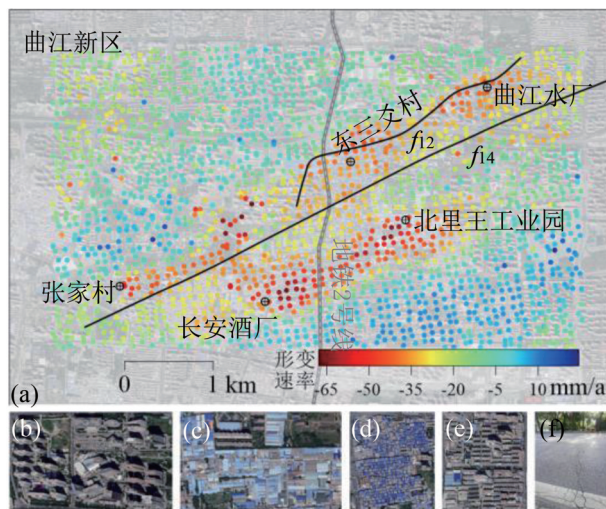
注:(a)B形变区地表形变;(b)陕西省体育训练中心2017年5月光学影像;(c)陕西省体育训练中心2018年4月光学影像;(d)电子城住宅区;(e)电子城住宅区

图9 B区域地表形变及光学影像

Fig.9 Surface deformation and optical image of Area B

位于曲江新区的C形变区内有两条呈NE向的沉降带,分别是长5.4 km的曲江水厂至张家村的沉降带和长2 km的北里王工业园至长安酒厂沉降带,沉降速率在长安酒厂处达到最大 -66 mm/a ,虽然曲江新区形变区在3个形变区中形变速率相对较缓,但分布面积最广。曲江水厂沉降带经过高层建筑较密集的陕西文化大厦周边(图10(b))、三爻小区等以及东三爻村棚户区(图10(d)),与东三爻地裂

缝带(f_{12})和临潼-长安断裂带(f_{14})走向一致,且曲江水厂处黄土湿陷III级,具有强湿陷性,因曲江新区的管道漏水浸泡致使 f_{12} 地裂缝出露于地表,地表水的入渗导致黄土发生湿陷变性是此条地裂缝活动的促进因素。长安酒厂沉降带经过北里王工业区(图10(c)),该工业区内多为库房等,无耗能较大的大型工厂,长安酒厂附近由于地裂缝导致路面出现大坡,居民住宅区依坡修建(图10(e)),加剧了地裂缝发育趋势。



注:(a)C形变区地表形变;(b)曲江水厂附近住宅区;(c)北里王工业园;(d)东三爻村棚户区;(e)长安酒厂附近住宅区;(f)曲江水厂附近地裂缝

图10 C区域(曲江新区)地表形变及光学影像

Fig.10 Surface deformation and optical image of Area C (Qjiang New District)

5 结 论

为了探明西安市地裂缝灾害链区域地表沉降趋势及与地裂缝发育的时空演化规律和联系,基于地表空间覆盖率和监测精度更高的NPSI技术,针对2017年3月至2018年3月西安城市区域的地裂缝及地表形变现象开展监测分析,并以水准数据验证精度达到了 ± 4.75 mm。结合地质条件和西安地裂缝发育情况的综合分析,重点划定了危害严重区域及敏感区段,并提出了后续监测建议:

(1)西安市地裂缝与地表失稳及不均匀沉降空间相关性较高,分别位于地裂缝活跃的西南郊分布3处形变区域。其中 f_4 、 f_5 地裂缝间的鱼化寨形变区最大形变速率可达到 -99 mm/a, f_7 、 f_8 地裂缝所在的电子城形变区最大形变速率可达到 -80 mm/a, f_{12} 、 f_{14} 地裂缝所在的曲江新区形变区最大形变速率可达到 -66 mm/a。

(2)结合过往多年的研究成果^[19-20]比较分析可知,西安市的地表失稳近年间已有减弱态势,但地裂缝的发展正在由东郊向西南转移。在地裂缝发育的总体控制下,地下水采掘及地上地下工程的建设使得西安市西南郊的不均匀沉降等地裂缝灾害链有所加剧,建议在地裂缝发育区域应该合理规划地下施工及地下水开采活动,减缓地裂缝及相关灾害的进一步发展。

参考文献(Reference):

- [1] Zhao Chaoying, Zhang Qin, Zhu Wu, *et al.* Monitoring on Xi'an ground fissures deformation with TerraSAR-X data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(1): 81-85.[赵超英, 张勤, 朱武, 等. 采用 TerraSAR-X数据监测西安地裂缝形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(1): 81-85.]
- [2] Peng Jianbing, Su Shengrui, Mi Fengshou, *et al.* Active Faults and geological disasters in the Weihe basin[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992.[彭建兵, 苏生瑞, 米丰收, 等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.]
- [3] Song Yanhui, Li Zhongsheng, Li Xinsheng, *et al.* Characteristics of ground fissures located at Lintong-Chang'an fault zone [J]. The Science Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 50-54.[宋彦辉, 李忠生, 李新生, 等. 临潼-长安断裂带内地裂缝特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 50-54.]
- [4] Rott H. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science[J]. Progress in Physical Geography, 2009, 33(6): 769-791.
- [5] Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics[J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 716-807. DOI: 10.3390/rs5020716.
- [6] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202-2212. DOI: 10.1109/36.868878.
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20. DOI: 10.1109/36.898661.
- [8] Berardino P, Fornaro G, Lanari R. 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. DOI: 10.1109/TGRS.2002. 803792.
- [9] 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): 1-5. DOI: 10.1029/2004GL021737.
- [10] Werner C, Wegmuller U, Strozzi T, *et al.* Interferometric point target analysis for deformation mapping[C]// Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003.
- [11] Werner C, Wegmuller U, Wiesmann A, *et al.* Interferometric point target analysis with JERS-1 lband SAR data[C]//

- Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003.
- [12] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, *et al.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: Squee SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9):3460-3470. DOI:10.1109/TGRS.2011.2124465.
- [13] Liu G X, Luo X J, Chen Q, *et al.* Detecting land subsidence in Shanghai by PS-networking SAR interferometry [J]. Sensors, 2008, 8(8):4725-4741. DOI:10.3390/s8084725.
- [14] Liu G X, Buckley S M, Ding X L. Estimation spatiotemporal ground deformation with improved persistent-scatterer radar interferometric [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (9) : 3209-3219. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2028797.
- [15] Zhang R, Liu G X, Tao L. An integrated model for extracting surface deformation components by PSI time series [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 544-548. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2274474
- [16] Liu Guoxiang. InSAR principles and applications [M]. Beijing: Science Press, 2019. [刘国祥. InSAR 原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [17] Liu Guoxiang. Permanent scatterer radar interference theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2012. [刘国祥. 永久散射体雷达干涉理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [18] Shen Hongyan, Fu Shanchun, Li Shicheng, *et al.* Analysis of Xi'an ground fissure formation mechanism and disaster control measures [J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2018, 17(4): 83-87. [沈红艳, 付善春, 李世成, 等. 西安地裂缝成因机理及灾害防治措施分析 [J]. 安阳工学院学报, 2018, 17(4): 83-87.]
- [19] Zhang Yanmei, Wang Ping, Luo Xiang, *et al.* Monitoring Xi'an land subsidence using Sentinel-1 images and SBAS-In SAR technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017 (4): 93-97. [张艳梅, 王萍, 罗想, 等. 利用 Sentinel-1 数据和 SBAS-InSAR 技术监测西安地表沉降 [J]. 测绘通报, 2017(4): 93-97.]
- [20] Peng Mimi, Zhao Chaoying, Zhang Qin, *et al.* Monitoring Xi'an land subsidence during 2015~2017 using Sentinel-1A images [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2264-2269. [彭米米, 赵超英, 张勤, 等. 利用 Sentinel-1A 数据监测大西安 2015~2017 年地面沉降 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2264-2269.]
- [21] Zhang Jianjun, Zhang Hexin, Zhang Maosheng, *et al.* Da preliminary study of land subsidence in the F4 ground fissure, Yuhazhai area, Xi'an, China [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017, 28 (4) : 31-37. [张建军, 张鹤馨, 张茂省, 等. 西安鱼化寨 F4 地裂缝地面沉降初步研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28(4): 31-37.]
- [22] Zhang Jianjun Zhang Hexin, Zhang Maosheng, *et al.* Study on the seepage deformation induce ground fissures and land subsidence in Xi'an [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(Sup.1): 301-309. [张建军, 张鹤馨, 张茂省, 等. 渗透变形引起的西安地面沉降地裂缝研究初探 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(增刊1): 301-309.]

Earth Fissures and Land Subsidence in Xi'an from NPSI Monitoring and Analysis

Li Shirao¹, Zhang Bo¹, Liu Guoxiang^{1,2}, Sha Yonglian¹, Wang Min¹, Wang Xiaowen^{1,2}, Zhang Rui^{1,2}

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Chengdu 611756, China)

Abstract: Due to the combination of tectonic background, groundwater extraction, active faults and other factors, the ground fissures in Xi'an have been intensified in recent years, causing many uneven surface subsidence. The urban geological hazard chain that has a strong destructive effect on underground buildings has attracted widespread attention from competent authorities and relevant experts. In order to infer the correlations between surface fissures and ground deformation, we use networked permanent scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (NPSI) to characterize the land subsidence in Xi'an, which has significant advantages in the accuracy and reliability of urban surface deformation monitoring. In this study, we obtain 15 Sentinel-1A SAR image acquired covering the ground fissures in Xi'an between March 2017 and March 2018. Our InSAR observations were verified with leveling measurements, with an accuracy of ± 4.75 mm. The results show that the ground fissures are developing in the southwestern suburbs of Xi'an. Over-withdrawal of groundwater and the construction of above-ground and underground facilities have exacerbated the trend of settlement and ground fissure development. Besides, the Yuhazhai zones, Electricity Mall zones, Qujiang New District zones and the subway Line 3 need to monitor the development trend of ground fissures in real time, and rationally plan groundwater mining and engineering construction. This systematic research may serve as a reference for related research and for the operational departments of road administration and urban construction of the city.

Key words: Xi'an; Earth fissures; NPSI; Sentinel-1A; Ground deformation