

引 用 格 式: Wei Congmin, Ge Weipeng, Shao Yanxiu, *et al.* Surface Deformation Field of Eastern Gansu Province by PS-InSAR Technique with Sentinel-1A[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 864-872.
[魏聪敏, 葛伟鹏, 邵延秀, 等. 利用 Sentinel-1A 合成孔径雷达干涉时间序列监测陇东地区地面沉降变形[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 864-872.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.4.0864

利用 Sentinel-1A 合成孔径雷达干涉时间序列监测 陇东地区地面沉降变形

魏聪敏¹, 葛伟鹏^{1,2}, 邵延秀^{1,2}, 吴东霖¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所西部强震室, 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于覆盖陇东地区同一轨道的 97 景 Sentinel-1A 卫星影像, 在 ISCE 和 StaMPS 数据处理平台上利用 PS-InSAR 技术进行叠加数据处理, 获得研究区自 2014 年 10 月至 2019 年 5 月的年平均地表 LOS 向形变场, 并对形变场结果进行二维网格滤波处理, 获取沉降中心的变化特征。研究结果表明: 陇东地区主要存在两类形变, 一类是由构造活动引起的地表形变, 主要分布在海原断裂与六盘山东麓断裂转换区附近, 跨海原断裂年平均形变约为 1 mm/a, 而六盘山东麓断裂附近断层无明显变形, 鄂尔多斯块体内部变形微弱; 另一类则是由人类工业活动, 如煤矿开采、地下水开采活动等导致的地表沉降, 主要影响区域为华亭矿区和宁正矿区, 均呈现漏斗状沉降形态, 年均最大沉降分别约为 8 mm/a 和 30 mm/a。

关 键 词: 哨兵卫星 Sentinel-1A; 永久散射体雷达差分干涉技术; 地表形变监测; 陇东地区; 矿区沉降速率

中图分类号: TP237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)04-0864-09

1 引 言

甘肃东部地区即陇东地区处于青藏高原向黄土高原逐渐过渡区域, 发育有典型的新生代构造单元, 如陇西地块、海原断裂、六盘山新生代造山带以及鄂尔多斯地块^[1]。陇东地区的平凉和庆阳处于鄂尔多斯地块内部, 煤炭资源丰富, 但因地处黄土高原, 生态环境脆弱, 生态恢复能力较差, 煤炭资源开发可能对生态环境造成不可逆的影响, 煤炭开采导致的地表沉降容易引发滑坡、地面坍塌等灾害。因此, 使用雷达干涉测量技术开展陇东地区大范围的地面沉降监测得到可靠的地表形变数据, 可为陇东

地区的生态保护、工业矿区开采安全事故预防提供决策分析依据。

目前, 广泛应用的地表形变监测技术包括: 大地水准测量、GPS 连续站及流动站观测以及合成孔径雷达干涉测量(InSAR)等技术。针对陇东地区的特殊性, 传统的大地水准测量耗时耗力, 且 GPS 站点在此区域内分布过于稀疏, 无法获取该区域内的地面沉降情况。相比以上两种测量手段, InSAR 技术具有全天时、全天候、空间采样点密度高等特点, 且无须建立地面观测站点, 就能够实现高精度形变监测^[2]。

近年来, 在传统差分干涉测量(D-InSAR)基础

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2020-06-22

基金项目: 中国地震科技星火计划(XH18048, XH19044)、甘肃省自然科学基金(17JR5RA340)、国家重点研发计划(2017YFC1500102)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2014IESLZ05)和国家自然科学基金项目(41304035, 41572197)共同资助。

作者简介: 魏聪敏(1994—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事地壳形变研究。E-mail: 15554186885@163.com

通讯作者: 葛伟鹏(1981—), 男, 山西稷山人, 副研究员, 主要从事 GPS 卫星大地测量与地壳形变观测等研究。E-mail: gewaipeng@gmail.com

上发展起来的时序 InSAR 技术主要以 Ferretti 等^[3]提出的永久散射体雷达差分干涉技术(PS-InSAR)和 Berardino 等^[4]提出的短基线集干涉技术(SBAS InSAR)应用最为广泛。相继被应用于监测由自然因素造成的地震活动^[5]、盆地沉降^[6-8]和火山活动^[9]等形变,以及由人为因素造成的矿区沉降^[10]、城市地表沉降^[11-14]和地铁网络沿线地面沉降^[15-16]等问题。

与传统 D-InSAR 技术相比,PS-InSAR 技术优势明显:其可视为面向点的处理,较少受地面恶劣环境影响,具有更强的适用性;可选择具有较长时间基线和垂直基线的干涉对,数据选取更灵活;受 DEM 精度影响更小;且较大程度上削弱了大气效应^[17]。

因此,为揭示陇东地区的地表形变现状及形变原因,采用 PS-InSAR 技术对覆盖陇东地区 Sentinel-1A 数据进行处理监测,获得 2014 年 10 月至 2019 年 5 月时间段内的雷达视线方向(LOS)年平均形变速率场,并结合相关资料对地表形变的时空演变特征进行分析说明。最后结论可为陇东地区的地质灾害和工业用地安全事故预防提供可靠的依据。

2 研究区域概况

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部(图 1),是“一带一路”沿线上具有丰富石油、天然气及煤炭等矿产资源的地区之一。以陇东地区为重点研究区,主要涉及甘肃省庆阳市和平凉市两个地级市,甘肃煤田地质局预测其煤炭资源储量达到 $1\,363 \times 10^8$ t。平凉市内的华亭矿区作为国家级 14 个大型煤炭基地之一黄陇基地的重要组成部分,2010 年以前就已经形成年产量 $2\,000 \times 10^4$ t 的开采规模^[18]。2007 年以来,庆阳市煤田开挖建设工作也逐步有序展开,环县沙井子矿区以及正宁—宁县矿区年产量均达 $1\,000 \times 10^4$ t 级以上。然而随着陇东地区煤炭资源的大量开采,地表不均匀沉降等问题日益突出。

目前关于陇东地区地表形变监测的研究相对较少,郭恒等^[19]基于 D-InSAR 技术对平凉地区的地表沉降进行了监测研究,但是对于陇东其他地区特别是针对陇东矿区的沉降研究比较匮乏。因此,本文对陇东地区地面沉降的监测,可以为城镇规划提供可靠的数据支持,同时对规避矿区地质灾害具有指导意义。

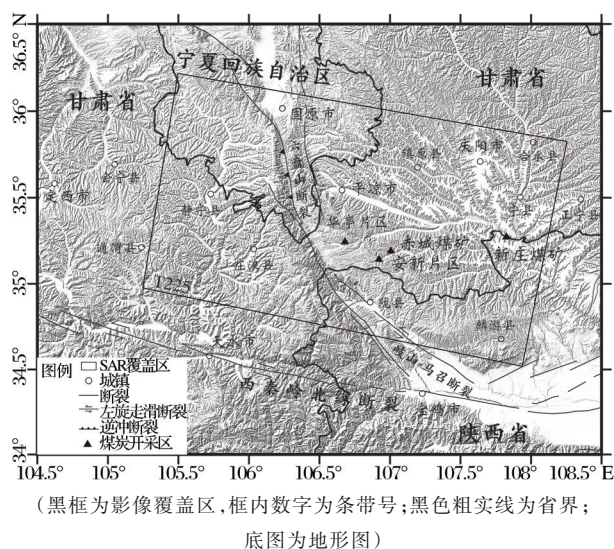


图 1 陇东研究区域地形地貌概况图

Fig.1 Landform overview diagram of eastern Gansu province

另外,从地质构造角度来看,印度板块与欧亚板块碰撞挤压,在青藏高原向鄂尔多斯地块过渡的区域形成挤压性构造边界带,发育有海原—六盘山等断裂,形成鄂尔多斯西南缘由左旋走滑向挤压逆冲的运动转换特征^[20-21]。近年来, GPS 速度场以及应变率分布结果^[22-23]揭示出鄂尔多斯地块周缘仅西南缘为压缩应变状态,是块体周缘现代构造活动最强烈的地区。其中,海原断裂周缘地震活动频繁,历史上曾发生过 1920 年海原 M8.6 级等多次 7 级以上强震,强震丛集现象显著^[24],但相对比六盘山断裂附近存在强震空区^[25],地震危险性较高。且此区域人口众多,本文对陇东地区附近大型构造断裂的地壳形变观测,为防震减灾建立有效数据基础。

3 数据选取与处理

3.1 数据选取

采用 2014 年 10 月至 2019 年 5 月约 5 a 同一轨道(轨道号为 225)共 97 景覆盖陇东地区的 Sentinel-1A 卫星 IW 成像模式、SLC 级别的降轨影像为数据源,并以相应区域时间的 Sentinel-1POD 精密定轨星历数据为辅助精轨数据。由于研究区域的升轨影像 LOS 向速度场获取的目的是主要关注六盘山地区的现今构造活动,这一轨道方向不能覆盖矿区并且覆盖同一区域的数据在 2017 年发生变化,无法对比矿区,需要结合其他处理技术,并且与降轨影像的 LOS 向不同,因此本文暂未采用升轨数据做对比分析。

2014年4月欧空局发射了Sentinel-1A卫星,该卫星在极地太阳同步轨道运行,轨道高度693 km,重访周期12 d,重访周期小,使得监测频率较高,能更细致地分析研究区地表形变的时空变化情况;IW模式数据采用TOPS方式来获取3个子条带,幅宽250 km,分辨率为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ ^[26],影像一致性好且噪声小;SLC数据包含地理参考数据、卫星姿态数据和地形形变相位信息^[27]。另外,本文所选用的数字高程模型数据(DEM)是选自SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)提供的分辨率为90 m的DEM。

3.2 永久散射体雷达差分干涉技术(PS-InSAR)基本原理

散射体的相对运动和雷达平台观测方向的变化使分辨率单元内的散射体会以不同的方式求和,从而导致影像失相干,但当一个散射体返回的能量比单元内其他散射体返回的能量大得多时,去相关相位将大大减少,这个散射体即定义为永久散射体(PS点)^[29]。常见的永久散射体有建筑物、裸露的岩石、人工角反射器等。永久散射体(PS点)具有以下特点:几何尺寸远远小于分辨率单元,回波信号很强^[14];其干涉相干性几乎不受时间基线 and 空间基线的影响,能在SAR影像中的相位信息长时间内保持稳定,具有较高的相干性^[14]。

PS-InSAR技术本质上属于合成孔径雷达干涉测量(D-InSAR),其基本原理是将某时段内覆盖某一地区的多景SAR影像按时间排列,基于某种原则(空间基线最小原则、时间基线最小原则、多普勒质心频率基线最小原则等)优化选取其中一景为主影像,其余为辅影像,将所有辅影像分别与主影像配准并差分形成干涉对,再采用某种方法(幅度阈值法、振幅离差指数阈值法、相干系数阈值法等)筛选出该地区对应影像中的PS点,在这些离散PS点上建立建模和解算得到其形变信息,再通过内插得到整个研究区的形变情况,最终反演出该地区地表在该时段内形变的过程和特征^[10,14,17]。

3.3 数据处理过程

利用ISCE软件^[28]和StaPMS软件^[29],采用永久散射体雷达差分干涉技术(PS-InSAR)开始时间序列数据处理。首先,基于时空基线距选取位于其二维空间中心的2017年9月30日的影像作为主影像,以尽量减少处理过程中空间基线和时间基线带来的影响,而剩余其他影像为从影像,将主影像分别

与从影像进行配准。然后,结合SRTM提供的分辨率为90 m DEM数据进行差分干涉处理,生成96对差分干涉对,获得时间序列差分干涉图,其中时空基线分布情况如图2所示。

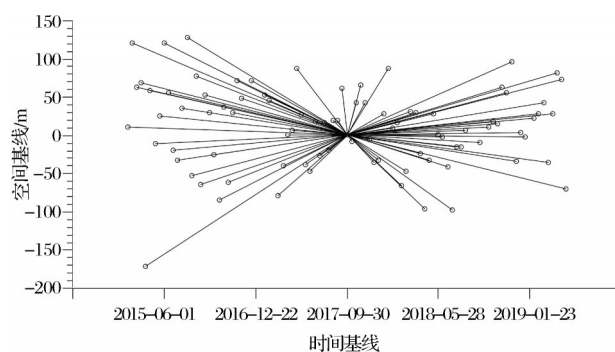


图2 时空基线分布图

Fig.2 Distribution of spatial-temporal baseline

同时,将配准后的影像根据相干系数和振幅离差阈值法等准则选则并提取不会受时间和空间失相关的永久散射体(PS点)1 886 484个,其中相干系数阈值设置为0.4,最终永久散射体提取情况如图3所示,通过对比遥感影像可知选取的永久散射体(PS点)主要分布在建筑物、道路以及裸露的岩石等地区,相干性较好,结果较为可靠(图3)。

进而,基于提取的永久散射体(PS点)进行差分干涉处理,获得差分干涉相位,建立函数分析模型迭代估算永久散射体(PS点)的线性形变速率、高程误差以及大气相位参数,最后去除大气延迟、DEM误差等,最终获得研究区域中永久散射体(PS点)的形变信息(图4)。

为了对上述结果进行验证,引入GPS台站观测结果进行对比分析。陇东地区可获取的GPS连续台站观测结果较少,但是中国地震局地震预测研究所在海原断裂与六盘山断裂交汇区建设了密集连续GPS观测剖面,为对比连续GPS垂向分量与InSAR结果提供了数据基础,将Su等^[10]研究的覆盖陇东地区的GPS垂向观测结果^[30]与PS-InSAR解算后相对应GPS站点附近的PS点LOS向形变结果进行对比(见图5及表1),发现GPS观测结果与InSAR观测结果基本匹配。另因LOS向与垂向结果转换精确度在毫米以内并不影响对结果的验证,因此这里不再多做转换。由于现今连续GPS观测结果的垂向精度可达1 mm,经过GPS观测验证,InSAR观测精度也可达毫米级。

由于陇东部分地区植被茂密,导致永久散射体(PS点)在此区域分布较为稀疏,引发区域形变信息

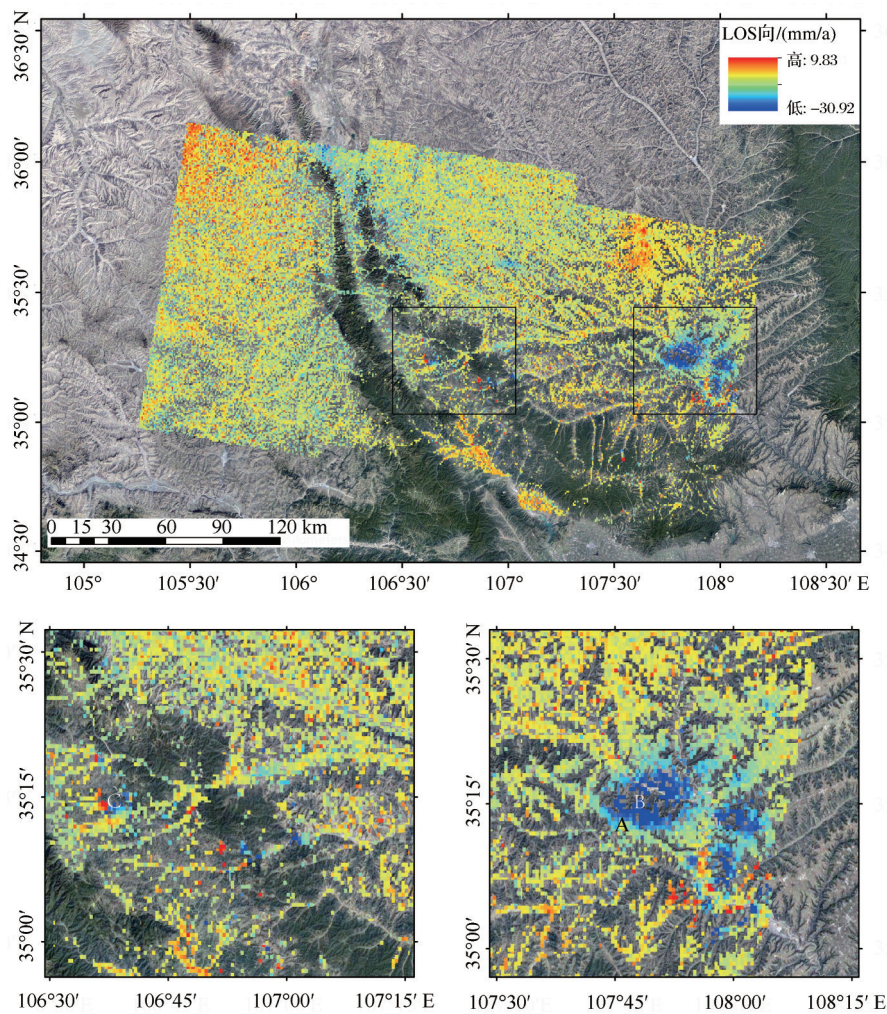


图 3 PS 点分布图
Fig.3 Location of PS points

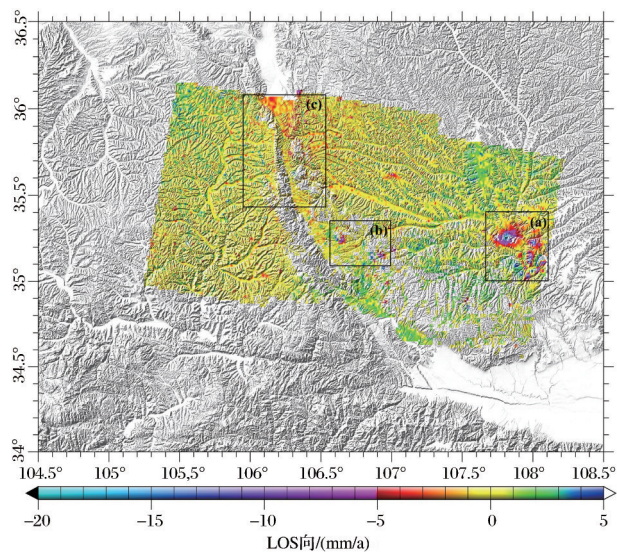


图 4 陇东地区地表年平均形变速率场
Fig.4 Average annual surface deformation rate field
along LOS in eastern Gansu province

表 1 陇东地区连续 GPS 站点观测值与其对应的 InSAR 观测值

Table1 The continuous GPS station observations in Longdong area and its corresponding PS InSAR observations

GPS 站点名称	经度 /°	纬度 /°	GPS 观测值(up) /(mm/a)	InSAR 观测值(Los) /(mm/a)
GSJN	105.76	35.53	0.96	0.77
LP02	105.61	35.97	1.38	1.28
LP04	105.96	35.95	1.40	1.68
LP06	106.24	35.92	1.52	1.30

获取较少,因此进一步做二维网格滤波处理,处理后的数据即可进行沉降中心附近的剖面观察。

4 陇东地区形变时间序列分析

据图 4 所示,观察年平均形变速率场并结合陇东地区地质资料和煤矿开采等资料可知,陇东地区主要有两类沉降,一类是由于矿区开采导致的地面

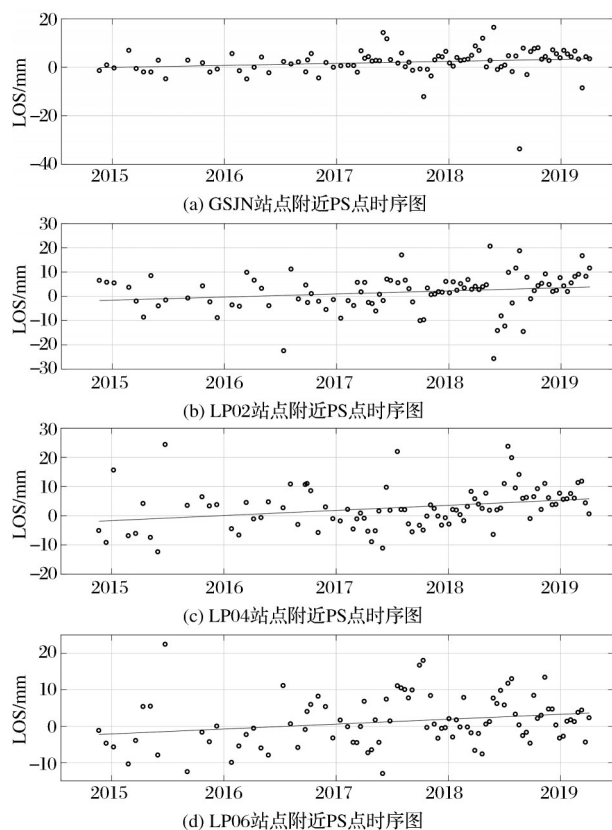


图5 连续GPS站点附近PS点累计形变时序图

Fig.5 Cumulative deformation sequence diagram of PS points near a continuous GPS site

沉降,另一类则是由构造控制的沉降。第一类矿区沉降,主要分布在平凉市的华亭矿区(如图4中b框所示),其中包括华亭片区、赤城片区和安新片区等,以及庆阳市的宁正矿区(如图4中a框所示),主要包括新庄煤矿等;第二类构造沉降,主要表现为如图4中所示地面沉降c区,主要由六盘山断裂和海原断裂所挟持。

并且,根据研究区域内典型特征点由2014年10月至2019年5月的累计形变进行时间序列分析(图6),可知新庄煤矿附近村庄A近5年来地面形变十分微小,近5年来累积沉降量仅2 mm左右(图6(a)),相对比北侧附近煤矿开采区而言其沉降并不明显,表明我们的观测结果比较可信。而新庄煤矿和华亭矿区因地下采空区导致其近5年来地面沉降呈现线性趋势(图6(b)、图6(c)),其中,新庄煤矿沉降中心(图3中B点)最大年平均沉降量约为30 mm/a;华亭矿区沉降中心(图3中C点)最大年平均沉降量约为12 mm/a。若不加以治理,此线性趋势会持续下去可能会导致矿区塌陷等灾害。

分析华亭矿区沉降量比新庄煤矿沉降量小很

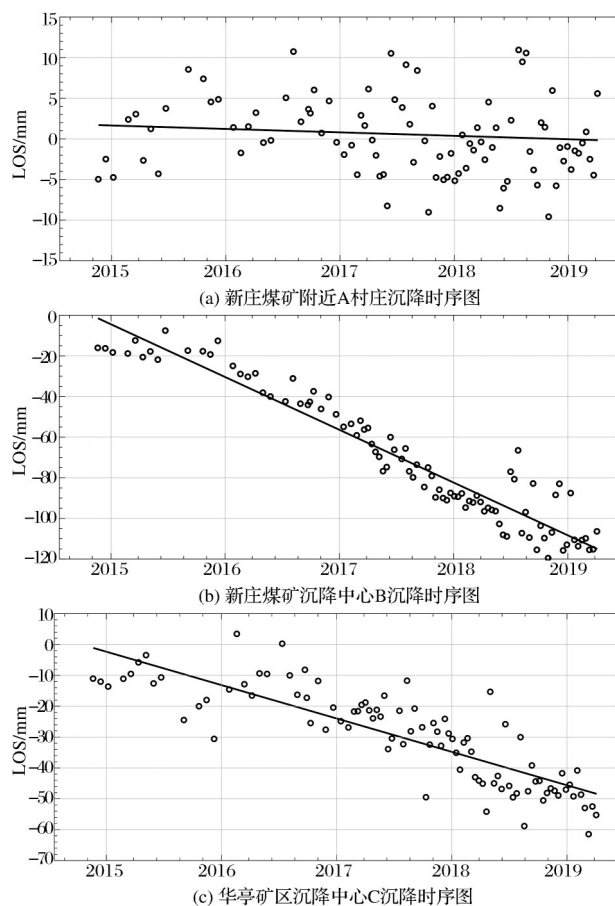


图6 研究区典型特征点累计形变时序图

Fig.6 Cumulative deformation sequence diagram of typical characteristic points in the study area

多的原因,主要是由于华亭煤矿在2014年(本文数据选取的开始时间)以前已经开采多年,而新庄煤矿近几年来才刚刚开始开采,因此两个矿区规模产量可能出现差距,造成同是矿区开采导致的沉降但由于开采年龄不同最大年均沉降量有所差距。

另外,在华亭矿区所取沉降中心C点附近发现有小部分地区与整体矿区沉降趋势不同,其存在地面抬升情况,结合遥感影像图分析是由于该区域近年来建造高层建筑物所致。因此,此类特殊情况并不影响对华亭矿区整体沉降的分析。在陇东地区还存在一类沉降,其沉降范围相比矿区沉降范围十分微小,在图4中仅表现为以星星点点的红色斑点状分布在山谷中。结合遥感影像图分析,此类沉降地区都有人类居住的痕迹,大部分是村庄或者城镇地区,因此推测此类沉降主要是由于抽取地下水所致。特别是在华亭矿区东北侧约50 km处,该区域沉降量较矿区沉降量较小,年均最大沉降量为11 mm/a,但沉降范围却比地下水开采的沉降影响范围要大,从遥感影像图中可知该区域为大片农田,

因此推测该区域是由于过度开采地下水用于浇灌农田,导致沉降范围比其他村庄沉降范围要大。

4.1 地表沉降与构造活动的关系

由断裂控制的地表沉降(图4(c)),可能是由于第四纪以来的构造运动使得鄂尔多斯盆地边缘的海原断裂、六盘山断裂等不断活动,形成构造地裂

缝,进而引发该区域附近的地表形变。鉴于由构造控制的形变较小,在陇东地区地表年平均形变速率场中不能很好地反应其断裂两侧的形变规律,因此对滤波处理后的格网文件跨断裂取沉降剖面(图7(c)),做InSAR结果剖面分析,进而对断裂进行活动性分析。

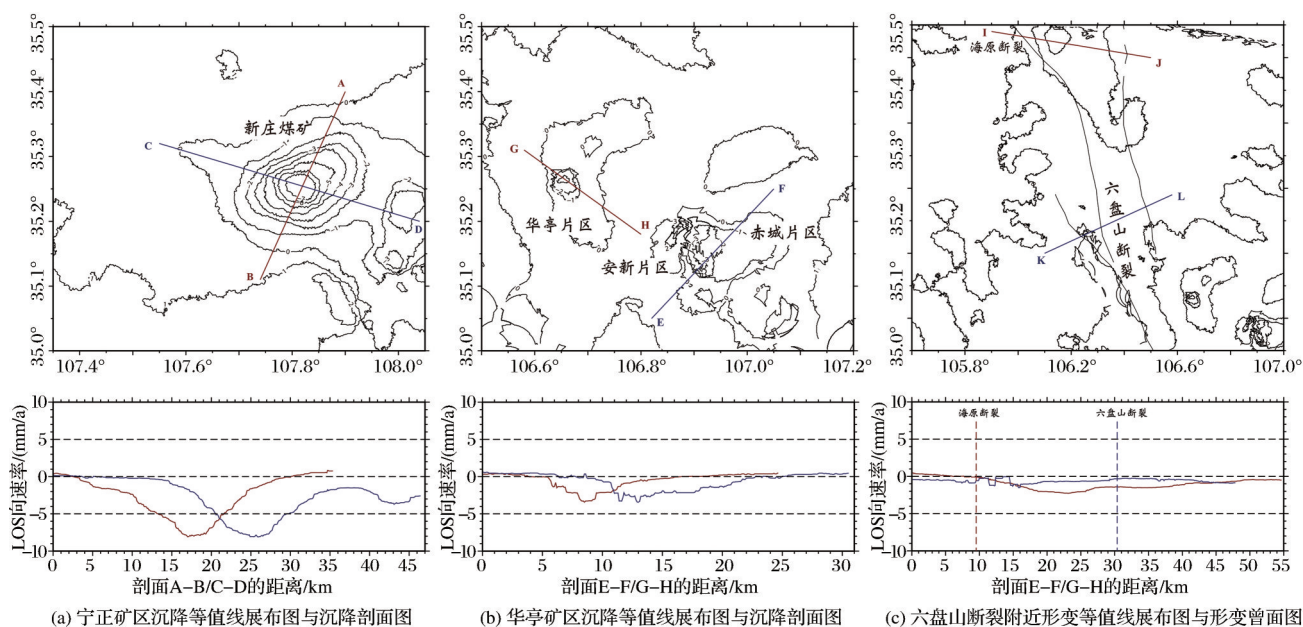


图7 陇东地区典型形变区域沉降等值线展布图与沉降剖面图

Fig.7 Regional settlement contour map and settlement profile map of typical deformation in eastern Gansu province

结果显示形变主要分布在海原断裂与六盘山东麓断裂转换区附近,海原断裂东南段两侧视线向(LOS向)年平均形变率为1mm/a,与郑文俊等^[31]利用GPS观测和断裂晚第四纪滑动速率反映该段滑动速率为1~3 mm/a基本匹配;而六盘山东麓断裂近断层无明显变形,鄂尔多斯块体内部变形微弱,说明六盘山断裂近年来处于闭锁状态,其结果与GPS速度场反演获得的结果一致^[32]。但是,因为六盘山断裂附近植被较为茂密,所以六盘山断裂附近的永久散射体(PS点)分布出现了沿断裂走向的条带状空区,所以我们获得的滤波结果并不如海原断裂东南段准确,若要进一步精确讨论其断裂活动性,应该在植被茂密处人工加以安装角反射器或应用其他大地测量手段进行进一步研究。

4.2 地表沉降与矿区开采的关系

根据《甘肃省华亭矿区总体规划(修编)环境影响报告书》中所述,华亭矿区面积为204.95 km²,煤炭资源量约为27.26亿t,矿区年产量规模达2.935×10⁸ t。其中,华亭片区现生产能力为1 540×10⁴ t/a;安新矿区现生产能力为770×10⁴ t/a;赤城矿区现

产能力为390×10⁴ t/a。《宁正矿区总体规划(修编)》表明宁正矿区总面积为1 786 km²,煤炭资源量约87亿t,矿区年产量规模约39×10⁷ t。宁正矿区主要有核桃峪、新庄等2个矿井,其各自生产能力约为800×10⁴ t/a。

结合以上陇东地区实际煤炭开采情况,可发现该地区形变最大的区域在空间分布上与矿区吻合,主要沉降区为华亭矿区(图4(b))和宁正矿区(图4(a)),其中位于宁正矿区的新庄煤矿沉降量最大,LOS向年平均最大沉降达30.92 mm/a。为区域性分析华亭矿区和宁正矿区的沉降情况,对滤波处理后的地表形变信息提取沉降等值线,并且沿图7中的A-B向、C-D向、E-F向、G-H向生成沉降剖面图(图7(a)、7(b)),发现沿剖面线煤矿开采区均呈现漏斗分布,其中宁正矿区的新庄煤矿漏斗中心沉降量约为8 mm/a,漏斗两侧沉降量约为0 mm/a,沉降面积约为130 km²;华亭矿区的华亭片区、安新片区、赤城片区漏斗中心沉降量在3 mm/a左右,漏斗两侧沉降量约为0 mm/a。说明华亭矿区和宁正矿区的煤矿开采仅影响到煤矿开采区域,对附近的村镇影响

较小。

特此说明,由于滤波结果是经过信号处理后的结果,其最终结果已经将离散的PS点信号高频部分去除,只保留了低频部分,因此漏斗沉降中心的结果远小于矿区沉降最大处PS点时序结果。滤波结果只为分析煤矿开采区区域性分布特征,为今后的治理工作提供数据基础,但其沉降量结果远不如PS点时序结果精确,所以最大沉降量结果应以PS点时序结果为准。

5 结 论

本文基于ISCE和StaMPS数据处理平台使用PS-InSAR技术处理了2014年10月至2019年5月同一轨道共97景覆盖陇东地区的Sentinel-1A雷达卫星SLC数据,获得了近5a来覆盖陇东地区(平凉、庆阳)的年平均地表LOS向形变场,揭示了陇东地区地表形变信息时空分布情况。

结果表明,陇东地区主要存在两类形变,一类是由构造活动引起的地表形变,主要分布在海原断裂与六盘山东麓断裂转换区附近,跨断裂年平均形变约为1 mm/a,而六盘山东麓断裂近断层无明显变形,说明六盘山断裂可能处于闭锁状态,与其他GPS等监测结果一致,并且鄂尔多斯块体内部变形微弱;另一类则是由人类工业活动如煤矿开采或者地下水开采活动导致的地表沉降,主要影响区域分布在平凉市的华亭矿区和庆阳市的宁正矿区,呈现漏斗状沉降形态,且根据沉降中心的时间序列形变特征分析,华亭矿区年均最大沉降约为8 mm/a,而新庄煤矿(宁正矿区)年均最大沉降为30 mm/a左右。

本文对陇东地区地面沉降的监测结果,有效揭示出区域地表变形以及变形的成因,可以为陇东地区的生态保护、工业矿区开采安全等事故预防提供可靠的地表形变数据,同时对规避矿区地质灾害具有指导意义。

参考文献(References):

- [1] Tian Qinjian, Ding Guoyu, Shen Xuhui. Seismic Tectonic Model of the Northeastern Corner of the Tibet Plateau [J]. *Earthquake*, 2002(1): 9-16.[田勤俭, 丁国瑜, 申旭辉. 青藏高原东北隅强震构造模型[J]. *地震*, 2002(1): 9-16.]
- [2] Chen Bingqian. A Study on InSAR for Subsidence Monitoring in Mining Area[D]. Xuzhou: China Mining University, 2015. [陈炳乾. 面向矿区沉降监测的InSAR技术及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.]
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Shan Xinjian, Zhang Guohong, Wang Chisheng, *et al.* Joint Inversion for the Spatial Fault Slip Distribution of the 2015 Nepal Mw7.9 Earthquake based on InSAR and GPS Observations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(11): 4266-4276.[单新建, 张国宏, 汪驰升, 等. 基于InSAR和GPS观测数据的尼泊尔地震发震断层特征参数联合反演研究[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(11): 4266-4276.]
- [6] Yang Chengsheng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, *et al.* Small Baseline Subset InSAR Technology Used in Datong Basin Ground Subsidence, Fissure and Fault Zone Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 945-950.[杨成生, 张勤, 赵超英, 等. 短基线集InSAR技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动监测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(8): 945-950.]
- [7] Yu Yongping, Lin Hong, Wang Huiqiang. Temporal Sequence InSAR Technique was Used to Monitor Land Subsidence in Guanghua Basin [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(S1): 157-159.[喻永平, 林鸿, 王会强. 利用时序InSAR技术监测广花盆地地面沉降[J]. *测绘通报*, 2015(增刊1): 157-159.]
- [8] Liu C, Zhao C, Zhang Q, *et al.* Large Coverage Surface Deformation Monitoring with Multiple InSAR Techniques and Multiple Sensor SAR Datasets: A Case Study in Linfen-Yuncheng Basin, China [C]// *Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2016: 2889-2892.
- [9] Ji Lingyun, Wang Qingliang, Cui Duxin, *et al.* Time Series of Deformation in Tengchong Volcanic Area Extracted by SBAS-DInSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 149-153.[季灵运, 王庆良, 崔笃信, 等. 利用SBAS-DInSAR技术提取腾冲火山区形变时间序列[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(4): 149-153.]
- [10] Lu Yanyan, Ke Changqing, Chen Deliang, *et al.* Application of PS-InSAR in Surface Subsidence Monitoring in Mining Area of Peixian [J]. *Geospatial Information*, 2016, 14(5): 96-99.[陆燕燕, 柯长青, 陈德良, 等. PS-InSAR在沛县矿区地表沉降监测中的应用[J]. *地理空间信息*, 2016, 14(5): 96-99.]
- [11] Xu Wenbin, Li Zhiwei, Ding Xiaoli, *et al.* Application of Small Baseline Subsets D-InSAR Technology to Estimate the Time Series Land Deformation and Aquifer Storage Coefficients of Los Angeles Area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(2): 452-461.[许文斌, 李志伟, 丁晓利, 等. 利用InSAR短基线技术估计洛杉矶地区的地表时序形变和含水层参数[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(2): 452-461.]

- [12] Zhang Yonghong, Wu Hongan, Kang Yonghui, *et al.* Ground Subsidence over Beijing-Tianjin-Hebei Region during Three Periods of 1992 to 2014 Monitored by Interferometric SAR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9): 1050-1058.[张永红, 吴宏安, 康永辉. 京津冀地区 1992~2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1050-1058.]
- [13] Li Haijun, Zhang Yaowen, Gu hongbiao, *et al.* Land Subsidence Detection based on PS-InSAR Technology in Northern Area of Langfang City[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(11): 26-31.[李海君, 张耀文, 谷洪彪, 等. 基于 PS-InSAR 技术的廊坊北部地区地面沉降监测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(11): 26-31.]
- [14] Zhang Jianming, Gan Shu, Yuan Xiping, *et al.* The Extraction and Analysis of Kunming Ground Deformation Characteristics based on PS-InSAR[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(1): 57-63, 93.[张荐铭, 甘淑, 袁希平, 等. PS-InSAR 技术的昆明地表沉降特征提取与分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(1): 57-63, 93.]
- [15] Jiang Decai, Zhang Yonghong, Zhang Jixian, *et al.* Uneven Land Subsidence Along Tianjin Subway Lines Monitored by InSAR Technology[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(6): 31-36.[姜德才, 张永红, 张继贤, 等. 天津市地铁线不均匀地表沉降 InSAR 监测[J]. 遥感信息, 2017, 32(6): 31-36.]
- [16] Zhu Xiuxing, Chen Mi, Gong Huili, *et al.* The Subsidence Monitoring along Beijing Subway Network based on MT-InSAR [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(12): 126-135.[祝秀星, 陈蜜, 宫辉力, 等. 采用时序 InSAR 技术监测北京地铁网络沿线地面沉降[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 126-135.]
- [17] Tao Qiuxiang. Study of Key Techniques of PS InSAR and Its Applications to Monitor Mining Land Subsidence [D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2010. [陶秋香. PS InSAR 关键技术及其在矿区地面沉降监测中的应用研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2010.]
- [18] Ma Yonghui. Study on the Environmental Impact of Coal Resources Development in Longdong Area of Gansu Province [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2010, 22(4): 95-97.[马永辉. 甘肃陇东地区煤炭资源开发对环境影响研究[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(4): 95-97.]
- [19] Guo Heng, Liu Zhiyang, Wang Zehui. Study on Surface Subsidence Monitoring in Pingliang Area based on DInSAR Technique [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2018, 141(19): 120-122.[郭恒, 刘志扬, 王泽辉. 基于 DInSAR 技术的平凉地区地表沉降监测研究[J]. 电子技术与软件工程, 2018, 141(19): 120-122.]
- [20] Deng Qidong, Zhang Weiqi, Zhang Peizhen, *et al.* Haiyuan Strike-slip Fault Zone and Its Tail Compression Structure[J]. *Seismology and Geology*, 1989, 11(1): 1-14.[邓起东, 张维岐, 张培震, 等. 海原走滑断裂带及其尾端挤压构造[J]. 地震地质, 1989, 11(1): 1-14.]
- [21] Zheng W J, Zhang P Z, He W G, *et al.* Transformation of Displacement between Strike-slip and Crustal Shortening in the Northern Margin of the Tibetan Plateau: Evidence from Decadal GPS Measurements and Late Quaternary Slip Rates on Faults[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 267-280.
- [22] Cui Duxin, Hao Ming, Li Yuhang, *et al.* Present-day Crustal Movement and Strain of the Surrounding Area of Ordos Block Derived from Repeated GPS Observations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3646-3661.[崔笃信, 郝明, 李煜航, 等. 鄂尔多斯块体周缘地区现今地壳水平运动与应变. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3646-3661.]
- [23] Qu W, Lu Z, Zhang M, *et al.* Crustal Strain Fields in the Surrounding Areas of the Ordos Block, Central China, Estimated by the Least-squares Collocation Technique[J]. *Journal of Geodynamics*, 2017, 106: 1-11. doi: 10.1016/j.jog.2017.01.005.
- [24] Zhang Peizhen, Min Wei, Deng Dongqi, *et al.* Paleoearthquakes and Recurrence of Strong Earthquakes of the Haiyuan Active Fault Zone[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(8): 705-713.[张培震, 闵伟, 邓起东, 等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 33(8): 705-713.]
- [25] The Earthquake Disaster Prevention Department of the State Seismological Bureau. Catalogue of Chinese Historical Strong Earthquakes: 23rd Century BC-1911 AD [M]. Beijing: Seismological Press, 1995.[国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录: 公元前 23 世纪—公元 1911 年[M]. 北京: 地震出版社, 1995.]
- [26] Wang Jiaqing, Shan Xinjian, Zhang Guohong, *et al.* Fault Slip Distribution Inversion and Co-seismic Deformation of the 2017 Jiuzhaigou M_s7.0 Earthquake based on InSAR[J]. *North China Earthquake Sciences*, 2018(2): 1-7.[王家庆, 单新建, 张国宏, 等. 2017 年九寨沟 M_s7.0 地震 InSAR 同震形变场与断层滑动分布反演[J]. 华北地震科学, 2018(2): 1-7.]
- [27] Li Dan, Yang Bin, Chen Cai. Obtaining Coseismic Deformation Field of Jiuzhaigou Earthquake with Sentinel-1A[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1141-1148.[李丹, 杨斌, 陈财. 基于 Sentinel-1A 数据反演九寨沟地震地表形变场[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 1141-1148.]
- [28] Rosen P A, Gurrola E, Sacco G F, *et al.* The InSAR Scientific Computing Environment[C]// EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. VDE, 2012: 730-733.
- [29] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, *et al.* Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation[J]. *Tectonophysics*, 2012, 514(1): 1-13.
- [30] Su X, Yao L, Wu W, *et al.* Crustal Deformation on the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau from Continuous GPS Observations[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 1-21.
- [31] Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, Yuan Daoyang, *et al.* Deformation on the Northern of the Tibetan Plateau from GPS Measurement and Geologic Rates of Late Quaternary Along the

- Major Fault [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (10): 2491-2508.[郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2491-2508.]
- [32] Hao Ming, Li Yuhang, Qin Shanlan. Spatial and Temporal

Distribution of Slip Rate Deficit Across Haiyuan-liupanshan Fault Zone Constrained by GPS Data[J]. Seismology and Geology, 2017(3): 471-480.[郝明, 李煜航, 秦姗兰. 基于 GPS 数据的海原-六盘山断裂带滑动速率亏损时空分布[J]. 地震地质, 2017(3): 471-480.]

Surface Deformation Field of Eastern Gansu Province by PS-InSAR Technique with Sentinel-1A

Wei Congmin¹, Ge Weipeng^{1,2}, Shao Yanxiu^{1,2}, Wu Donglin¹

(1.Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;

2.Lanzhou National Geophysical Observation and Research Station, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through taking 97 Sentinel-1A SAR images from October 2014 to May 2019 covered most parts of Eastern Gansu province as experimental data, we monitored the surface deformation applying PS-InSAR technique for superimposed data processing based on ISCE and StaMPS to obtain the annual mean LOS rate of surface deformation field. Moreover, we filtered the LOS velocity field using two-dimensional mesh filtering to obtain the variation characteristics of the subsidence center. Our results reveal that there have two patterns of surface deformation. (1) Ground deformation caused by tectonic activity mainly locates around Haiyuan fault, whose mean annual LOS rate of deformation is $\sim 1\text{mm/a}$. However, there is no obvious deformation near the Liupanshan fault. Meanwhile, the internal deformation of the Ordos Block is subtle. (2) Another surficial deformation caused by mining activity occurs in the regions of Huating Mining Area and Ningzheng Mining Area, in which a ground subsidence funnel has been found. According to the time series deformation characteristic analysis of the settlement center, we know the mean annual LOS rate of deformation in the Huating Mining Area and Ningzheng Mining Area are $\sim 8\text{ mm/a}$ and $\sim 30\text{ mm/a}$, respectively.

Key words: Sentinel-1A; PS-InSAR; Surface deformation monitoring; Eastern Gansu province; Subsidence rate of mining areas