

引 用 格 式:Lin Hui,Ke Changqing.Monitoring Surface Deformation in Changzhou City Using COSMO-SkyMed Data[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(3):599-606.[林辉,柯长青.COSMO-SkyMed 数据在常州市地表形变监测中的应用[J].遥感技术与应用,2016,31(3):599-606.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0599

COSMO-SkyMed 数据在常州市 地表形变监测中的应用

林 辉,柯长青

(南京大学江苏省地理信息技术重点实验室,江苏 南京 210023)

摘要:小基线集成孔径雷达干涉测量技术(SBAS-InSAR)已成功应用于城市地表形变监测,并表现出极大的潜力和优势。X 波段高分辨率雷达卫星在地表微小形变探测方面较 C 波段和 L 波段更为敏感。选取覆盖常州地区 COSMO-SkyMed 高分辨率 SAR 影像,采用 SBAS-InSAR 方法获得了地表形变时间序列,对比水准观测数据,分析了干涉测量结果的精度,根据历史地下水位监测数据,分析了地下水水位变化对地表形变的影响。结果表明:干涉测量结果与水准观测数据具有很好的一致性,沉降区域主要发生在武进区,最大沉降量超过-40 mm,主城区出现了轻微的回弹现象,回弹达到+5 mm;地下水水位持续上升与地面沉降减缓、地面回弹趋势一致,地下水水位变化仍然是常州市地表形变的主要影响因素。

关 键 词:地面沉降;COSMO-SkyMed;SBAS-InSAR;常州

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)03-0599-08

1 引 言

过去几十年,苏锡常地区由于过度开采地下水,发生了比较严重的地面沉降,并且地面沉降灾害发生范围广、持续时间长,给当地社会经济造成了巨大的损失^[1]。过去监测地面沉降的测量方法有水准测量和全球定位系统(Global Positioning System, GPS),而近 20 多年发展起来的一种先进遥感技术—合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)具有全天时、全天候、高形变灵敏度、高分辨率、覆盖范围广等突出特点,克服了 GPS、水准测量作业周期长、空间采样率低等缺陷,很好地补充了传统的地面沉降监测方法。InSAR 技术发展迅速,不断涌现出一些新的方法,如差分干涉测量^[2-3](Differential InSAR, DInSAR)、永久散射体干涉测量^[4](Permanent Scatter-

ers InSAR, PS-InSAR)、小基线集干涉测量^[5](Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)等。目前,InSAR 技术已成功应用于滑坡^[6]、地震^[7]、火山^[8]、矿区沉降^[9]、城市地面沉降^[10-11]等地表形变监测。刘金龙等^[9]采用 C 波段 ENVISAT ASAR 和 L 波段 ALOS PALSAR 数据,并利用 DInSAR 方法监测河北峰峰煤矿地面沉降,结果与水准测量数据基本一致。雷坤超等^[12]采用 ENVISAT ASAR 的 C 波段数据,并利用 PS-InSAR 方法成功获取了廊坊市年平均沉降速率和沉降中心位置。季灵运等^[8]采用 JERS-1 的 L 波段数据,并利用 SBAS-InSAR 监测腾冲火山形变序列,精度达到亚厘米级。Calò 等^[13]采用 COSMO-SkyMed 的 X 波段数据,并利用 SBAS-InSAR 成功监测了位于意大利中部 Ivancich 地区的滑坡形变。Hu 等^[14]采用 ENVISAT ASAR

收稿日期:2015-05-01;修订日期:2015-08-14
基金项目:国家自然科学基金项目(41371391),江苏省科技计划项目(BE2013702)。
作者简介:林 辉(1990—),男,湖北孝昌人,硕士研究生,主要从事 InSAR 技术及其应用研究。E-mail: njulinhui@163.com。
通讯作者:柯长青(1969—),男,陕西丹凤人,教授,主要从事遥感及其应用研究。E-mail: kecq@nju.edu.cn。

的 C 波段数据,并利用 SBAS-InSAR 监测北京市地面沉降,所得结果与水准测量结果一致。

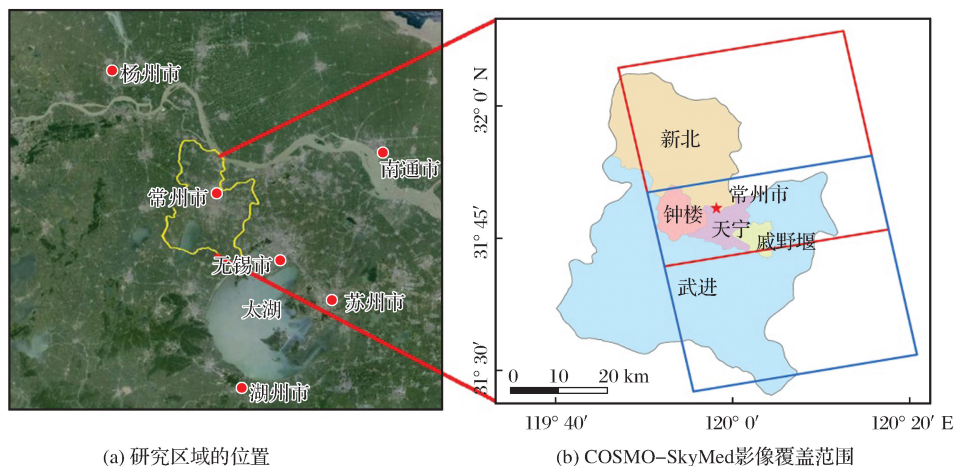
传统的 DInSAR 侧重于短时间间隔的单次形变,缺乏多次观测,受时间、空间失相干和大气相位的干扰等因素的影响明显,PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 等时序干涉测量方法能够很好地克服传统 DInSAR 的缺点,并得到了广泛的应用^[10-14]。PS-InSAR 方法一般需要 20 景以上的 SAR 影像,在影像数目小的情况下,时间基线、空间基线过长会引起较为严重的失相干,无法将非线性形变相位和噪声、大气延迟相位有效地分离出来,因而采用 PS-InSAR 无法得到可靠的形变结果^[15]。对于 SBAS-InSAR 方法,较小数目的 SAR 影像就能满足要求,SBAS-InSAR 限制长基线导致的时空去相干,尽可能多地利用小基线的干涉对,增加了时间上的采样率,提高了形变监测的精度^[16-17]。本文所用到的同一覆盖 COSMO-SkyMed 影像数目只有 12 景,影像数目较小。目前,国内利用 COSMO-SkyMed 高分辨率卫星数据进行 InSAR 处理的研究不多。综合以上考虑,本文以常州市作为研究区域,利用 SBAS-InSAR 方法处理 X 波段 COSMO-SkyMed 高分辨率雷达数据,获取了常州地区地表形变时间序列。通过对比水准数据与 InSAR 测量结果,分析

测量结果的精度;结合历史地下水位观测资料以及水准观测数据,探讨了地下水位变化对地表形变的影响、地面沉降空间分布规律以及地面沉降的发生原因。

2 研究区域和数据

2.1 研究区域概况

常州市位于江苏南部,长江三角洲平原腹地,属太湖冲积平原区(图 1(a)),地理位置为 $31^{\circ}09' \sim 32^{\circ}04'N$, $119^{\circ}08' \sim 120^{\circ}12'E$ 。市辖区包括新北区、钟楼区、天宁区、戚墅堰区和武进区(图 1(b))。该地区地质条件十分复杂,发育有多个含水砂层和软土层,在地质历史时期充填非常丰富的地下水,其中埋藏于 70~160 m 间的第二层承压含水层,是常州地区地下水主要开采层^[1,18]。常州市的地面沉降发生晚、发展快、波及广。1967 年沉降还不明显,70 年代有沉降迹象,1984~1991 年沉降速度较大,保持 40~50 mm/a 的高速下沉,中心城区累积最大沉降量达 949 mm^[19-20]。市区及东南部武进区部分乡镇地面沉降相对比较严重,累积沉降量均已超过 1 000 mm;历年监测显示 1983~2000 年,该地区新增加了 588 mm 的沉降量,累积沉降量已达 1 146 mm^[1]。



(a) 研究区域的位置

(b) COSMO-SkyMed影像覆盖范围

图 1 研究区域的位置与 COSMO-SkyMed 影像覆盖范围

Fig.1 The sketch map of study area

2.2 数据

2.2.1 COSMO-SkyMed 影像数据

COSMO-SkyMed (Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation) 是由意大利航天局和国防部共同研发的高分辨率雷达卫星星座,由 4 颗 X 波段合成孔径雷达卫星组成。COSMO-SkyMed (CSK) 影像数据具有几何分辨率高、

覆盖范围广、入射角可选、多极化等特点,加上精密的轨道数据,在利用重复轨道干涉测量来监测地表形变方面具有很大优势。本文使用了升轨的 CSK 影像数据,Track 为 99999,图 1(b)中红色和蓝色多边形各有 12 景影像。影像数据由 SAR1 和 SAR3 获取,极化方式均为 HH,影像中心入射角约为 26° ,成像模式为条带模式。条带模式又分 HIMAGE 和

PingPong 两种模式,在 HIMAGE 模式下,雷达发射天线和接收天线配置不随时间变化,能够接收每个地面散射体的全多普勒波束宽度。HIMAGE 模式幅宽约 40 km,影像分辨率为 3 m。由于高分辨 X 波段 SAR 影像,相比 C 波段和 L 波段,波长更短,对地表微小形变更为敏感,其在城市地表微小形变探测方面具有明显的优势^[21]。

表 1 CSK 影像参数
Table 1 Parameter of CSK images

| 编号 | 卫星 | 轨道号 | 极化方式 | 日期 | 垂直基线/m | 时间基线/d |
|----|------|-------|------|----------|---------|--------|
| 0 | SAR3 | 14810 | HH | 20110721 | 268.27 | 359 |
| 1 | SAR3 | 15284 | HH | 20110822 | -520.35 | 327 |
| 2 | SAR3 | 15758 | HH | 20110923 | 88.04 | 295 |
| 3 | SAR3 | 16232 | HH | 20111025 | -79.19 | 263 |
| 4 | SAR3 | 16943 | HH | 20111212 | 207.13 | 215 |
| 5 | SAR1 | 25001 | HH | 20120120 | -372.15 | 176 |
| 6 | SAR1 | 25475 | HH | 20120221 | 305.20 | 144 |
| 7 | SAR1 | 25949 | HH | 20120324 | -130.77 | 112 |
| 8 | SAR1 | 26423 | HH | 20120425 | -915.56 | 80 |
| 9 | SAR1 | 26897 | HH | 20120527 | -39.29 | 48 |
| 10 | SAR1 | 27371 | HH | 20120628 | -778.00 | 16 |
| 11 | SAR1 | 27608 | HH | 20120714 | 0 | 0 |

2.2.2 水准数据和地下水位数据

水准数据由常州市测绘院提供,有 5 个二等水准监站的数据,分别分布在新坊桥(L1)、天安工业村(L2)、牛塘初中(L3)、精细化工(L4)、礼嘉镇政府(L5)(图 3)。水准数据每两年测一次,本文使用的是 2006~2014 年的数据。地下水位数据是从《中国地质环境监测地下水年鉴 2006~2012》获得,地下水位监测站(W0)位于常州市三井浦家村月光岛院内(图 3),该监测站能够监测潜水层和承压水层的水位变化。

2.2.3 DEM 数据

DEM 数据来自航天飞机雷达地形测绘(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM),由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量。SRTM DEM 数据已经升级到版本 4,该版本数据较以往有很大改进,采用了新的插值方法和更好的辅助 DEM,数据质量较好,分辨率为 90 m,常州地区地形平坦,高程变化很小,低分辨率的 DEM 能够满足要求^[22]。用 DEM 数据来模拟地形相位,并在干涉图中作为地形相位成分予以剔除。

3 研究方法和数据处理

3.1 SBAS-InSAR 原理

SBAS-InSAR 是新近发展的一种 DInSAR 时间序列分析方法,最早由 Berardino 等^[5]提出,它是将所有获得的 SAR 数据自由组合形成干涉对,设置空间基线、时间基线阈值,得到时空基线小于阈值的若干个小基线集合,每个集合的地表形变时间序列可以利用最小二乘法(Least Square, LS)求解,然后利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)将多个小基线集合联合起来求解,有效地解决不同小基线集合之间由于时空基线过长造成的时间不连续问题,提高了监测的时间分辨率,有效地解决了总体法方程秩亏的问题,最终得到覆盖整个观测时间的地面沉降序列。

假设有 $N + 1$ 景覆盖同一地区的 SAR 影像,获取时间依次为 t_0, t_1, \dots, t_N ,每景影像至少可以与另一景影像构成干涉对。设定基线阈值,将基线小于该阈值的 SAR 影像分为一组,共分为 L 组,最终得到 M 幅差分干涉图,其中 M 满足以下不等式(假定 N 为奇数):

$$\frac{N + 1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N + 1}{2} \right) \tag{1}$$

假设所有的差分干涉图都是正确解缠的,而且利用某个稳定或者形变量已知的高相干点(x_0, r_0)进行校正。在去平地效应以及地形相位后,对于第 i 幅差分干涉图,假设 $t_B > t_A$,在方位—距离像素坐标系中,任意像元(x, r)处的差分干涉相位可表示为:

$$\begin{aligned} \delta\phi_i(x, r) = & \phi(t_B, x, r) - \phi(t_A, x, r) \approx \\ & \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] + \frac{4\pi}{\lambda} \times \\ & \frac{B_{\perp i} \xi}{r \sin \theta} + [\phi_{atm}(t_B, x, r) - \\ & \phi_{atm}(t_A, x, r)] + \Delta\phi \end{aligned} \tag{2}$$

其中: $\phi(t_i, x, r)$ 和 $\phi(t_i, x, r)$ 为 t_B 和 t_A 时刻的相位, $d(t_B, x, r)$ 和 $d(t_A, x, r)$ 分别是 t_B 和 t_A 时刻相对于参考时刻 t_0 的雷达视线向(Line of Sight, LOS)形变量, λ 是雷达中心波长。 $\frac{B_{\perp i} \xi}{r \sin \theta}$ 为差分干涉处理中 DEM 误差引起的相位,其大小与垂直基线 $B_{\perp i}$ 成正比,与斜距 r 成反比,且与卫星视角 θ 有关; $[\phi_{atm}(t_B, x, r) - \phi_{atm}(t_A, x, r)]$ 为大气延迟相位差, $\Delta\phi$ 为其他噪声。

在精确解缠后,线性形变和 DEM 误差相位可构建新的 SBAS 线性模型方程:

$$[T,K]\rho'=\delta\phi$$

(3)

其中: T 是与时间相关的稀疏矩阵, K 是与空间基线相关的系数矩阵,其中线性形变相位 ρ' 可以表示为:

$$\rho'=[v\ \xi]^T$$

(4)

其中: v 为线性形变速率, ξ 为 DEM 误差。在获取线性形变相位和 DEM 误差后,将其从干涉图中减去,得到残余相位,其中包含大气延迟相位、非线性形变相位和失相干噪声等。根据残余相位在时间和空间上的不同特性进行滤波,就能够分离出非线性形变相位和大气延迟相位。

3.2 数据处理

采用瑞士 SARmap 公司研发的雷达影像处理软件 SARscape 处理影像数据,针对 CSK 原始数据中的无效值,在多视处理的时候可以自动进行内插。根据小基线集(SBAS)网络构建的一般原则,尽量选择较小的基线阈值来抑制时空去相干的影响^[8,23],选择垂直基线 200 m 和时间基线 300 d 来构建小基线网络,共产生了 16 个干涉对(图 2)。对每个干涉对均利用两轨法 DInSAR 技术处理,主要步骤包括:原始 SAR 信号成像、图像配准与干涉、外部 DEM 模拟、基于精密轨道和控制点数据的基线精确估计、相干系数计算、干涉图自适应滤波、相位解缠。为了削弱相位噪声,增加相干性,同时为了检测相对大尺度的形变信息,对干涉图进行了多视处理,方位向视数为 11,距离向视数为 11,对应地面分辨率为 25 m,相干性阈值选择 0.3,相位解缠采用最小费用流(Minimum Cost Flow,MCF)算法^[24]。通过差分干涉相位估计研究区域的线性形变相位,并转换为 LOS 方向形变速率。然后从原始差分干涉相位中减去线性形变相位和残差地形相位,再对残余相位进行解缠,利用奇异值分解方法求解非线性形变相位得到时间序列累积形变相位。对于大气延迟相位的估计,首先在时间域上进行高通滤波(High Pass filtering,HP)处理,然后在空间域上进行低通滤波(Low Pass filtering,LP)处理,从而实现大气延迟相位的分离^[5]。

4 结果与分析

4.1 常州市地表形变结果

采用 SBAS-InSAR 方法处理覆盖研究区域的 SAR 影像数据,获得了常州地区地表形变时间序列

和空间分布图,负值代表地面沉降,正值表示地面回弹,像元值表示从 2011-07-21~2012-07-14 发生的地表形变量(图 3)。

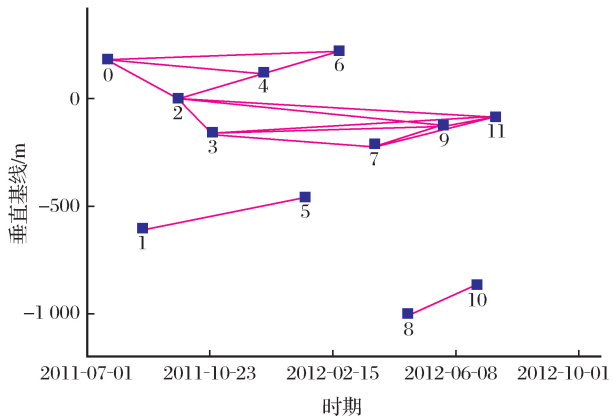


图 2 小基线干涉对分布图

Fig.2 Distribution of small-baseline pairs

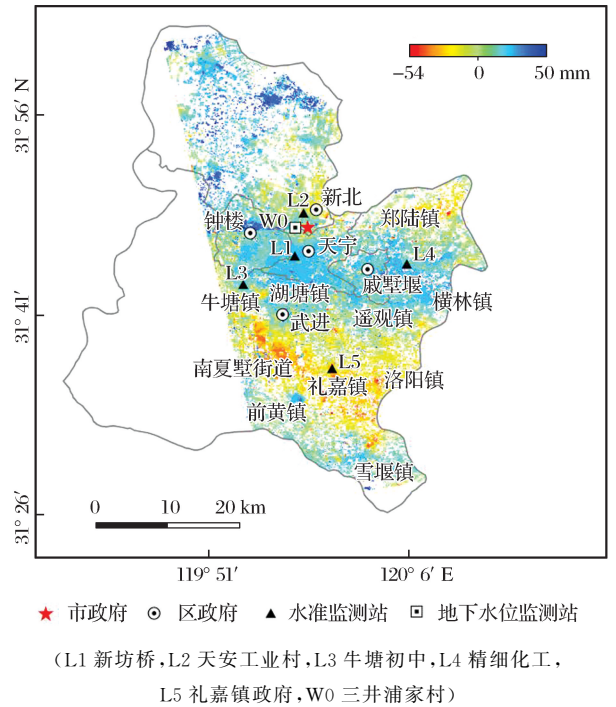


图 3 地表形变空间分布图(2011.07.21~2012.07.14)

Fig.3 Spatial distribution of surface deformation from 21st July 2011 to 14th July 2012

总体来看,地面沉降空间分布差异明显,发生地面沉降的地区主要分布在武进区,而中心城区(钟楼区、天宁区和戚墅堰区)和新北区大部分区域则出现了一定程度的地面回弹。局部来看,武进区以南区域出现了明显的沉降,牛塘镇、湖塘镇南部、南夏墅街道、礼嘉镇和洛阳镇沉降区域连成一片,牛塘镇的沉降量达到-15 mm,南夏墅街道和礼嘉镇沉降达

到-20 mm, 洛阳镇的最大沉降量超过了-40 mm, 武进区东北部, 沉降不明显, 郑陆镇的沉降量达到-7 mm; 地面回弹区域分布范围较广, 从新北区至中心城区(钟楼区、天宁区、戚墅堰区)再到遥观镇、横林镇一带都出现了地面回弹现象, 前黄镇至雪堰镇也发生了地面回弹。其中, 中心城区地面回弹量约+5 mm。

高铁、桥梁、轨道交通、高速公路、城市建筑群等重点目标的形变情况是人们所广泛关注的, 这些重点目标的形变情况关系到人们的住行安全。为此在研究区域选取了位于高铁站、高速公路(P1)以及房屋建筑(P2~P4)上的目标点来进行分析(图 4(a)), 并获

取了目标点的形变结果。图 4(b)是京沪高铁常州北站沿线沉降剖面曲线, 常州北站是从 2011 年 6 月 30 日开始运营的, 在大约一年的时间里, 常州北站发生了较为明显的沉降, 沉降量达到 10 mm, 高铁站附近沿线最大沉降量超过 15 mm, 另外, 在远离高铁站方向, 沉降量明显减小。图 4(c)是高速公路(P1)和房屋建筑(P2~P4)等目标点的时间序列形变结果, P1 位于龙虎塘街道沪宁高速上, 该点呈现出逐渐沉降的趋势, 累积沉降量达到 10 mm; 点 P2~P4 位于房屋建筑上, 且都处在沉降区(图 4(a)), P2 沉降达到 11 mm, P3 沉降约为 20 mm, P4 沉降超过 25 mm, 都呈现出了比较明显的沉降趋势。

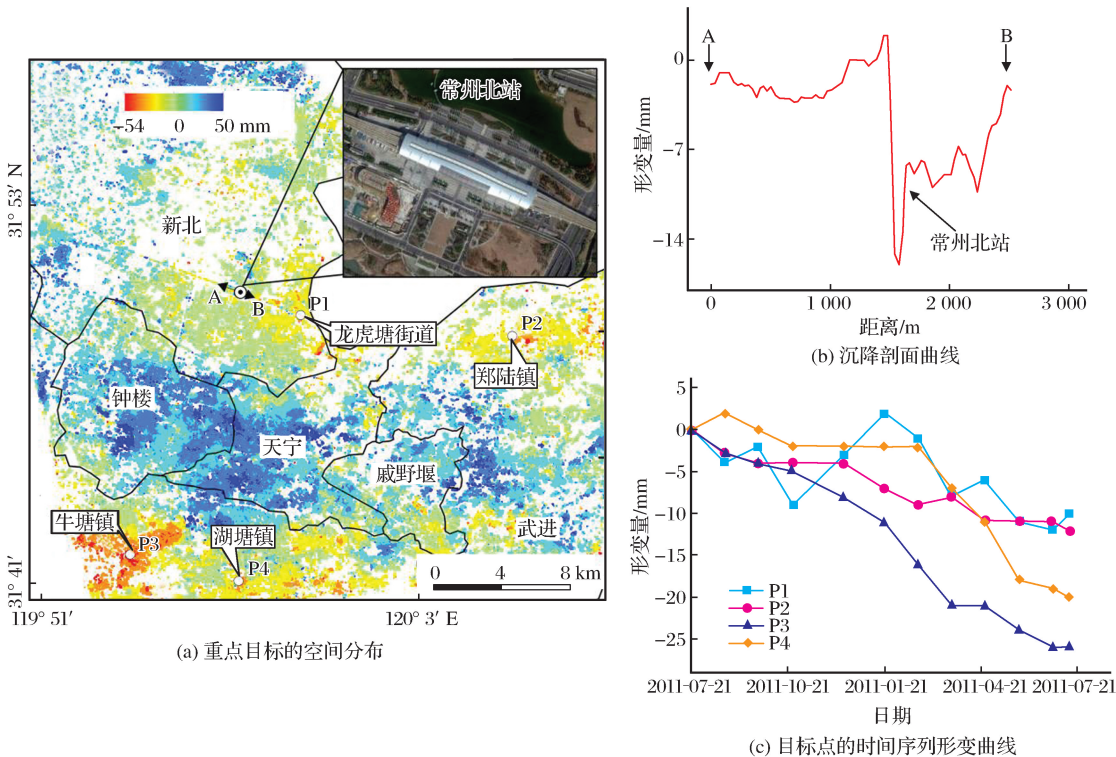


图 4 重点目标的空间分布, 沉降剖面曲线与目标点的时间序列形变曲线

Fig.4 Spatial distribution of target points,subsidence profile curve,time series deformation curve of target points

4.2 精度比较

历史水准数据获取成本高, 时间采样率低, 而且与 SAR 影像获取日期存在时间间隔, 不能直接利用水准进行精度分析。为了利用有限的水准数据, 采

用多项式拟合数学方法来拟合常州市 2006~2014 年历史水准观测数据, 得到结果见表 2。另外, 利用水准监测站的地理位置信息, 可以提取水准监测站的 SBAS-InSAR 测量值。从表 2 可以看出, 水准测

表 2 SBAS-InSAR 计算结果与水准拟合结果对比

Table 2 Comparison of SBAS-InSAR results with the leveling fitting results

| Points | L1(新坊桥) | L2(天安工业村) | L3(牛塘初中) | L4(精细化工) | L5(礼嘉镇政府) |
|------------|---------|-----------|----------|----------|-----------|
| 水准测量 | 2.8 | 0.1 | -1.0 | -0.3 | -18.6 |
| SBAS-InSAR | 5.0 | -1.9 | 0.5 | 3.6 | -14.6 |
| 相对误差 | -2.2 | 2.0 | -1.5 | -3.9 | -4.0 |

量与 SBAS-InSAR 误差在 $\pm 4\text{ mm}$ 之间,表明 SBAS-InSAR 技术对地表形变的监测精度可以达到亚厘米级。

4.3 原因分析

常州是长江三角洲经济最发达的地区之一,人口密集,城镇众多。近几十年来,城乡经济迅猛发展,地表水污染严重,河道水质普遍下降,以地表水入渗作为主要补给来源的地面以下潜水层也遭受污染,生产生活用水逐渐转为以开采承压水为主,而常州市区主要开采深部空隙第二层承压水^[25](图 5)。1960 年以前深层地下水开采量极小;1960~1970 年社会经济开始发展,城市供水得不到满足,地下水开采量明显增大;1970~1994 年,高耗水工业(印染业、纺织业)发展迅速,外围乡镇开始大量开采地下水,并逐渐超越中心城市地下水开采量,地下水开采量逐年剧增。1994 年以后,地下水的开采引起了政府的高度重视,制定了一系列的管理规章,限制地下水的开采^[19]。到 2000 年,政府通过决定禁止开采地下水,并采用回灌措施;2005 年以后,地下水位普遍回升^[26]。

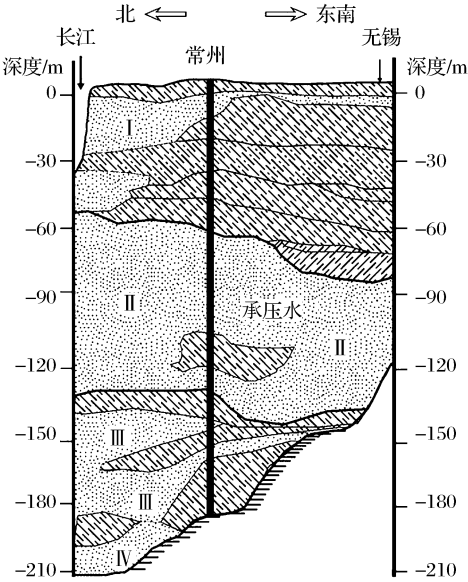


图 5 常州地区水位埋深示意图
Fig.5 Buried depth of groundwater

图 6 反映的是第二层承压水水位变化和水准监测站的地表形变趋势,地下水位监测站(W0)和水准监测站(L2)相距很近,可以进行比较分析(图 3)。从图 6 可以看出,第二层承压水水位从 2006~2012 年一直保持上升趋势,水准观测数据同样保持上升趋势,可以发现第二层承压水水位变化与地面回弹

趋势具有很好的一致性,这与缪晓图等^[15]的研究结论相符。

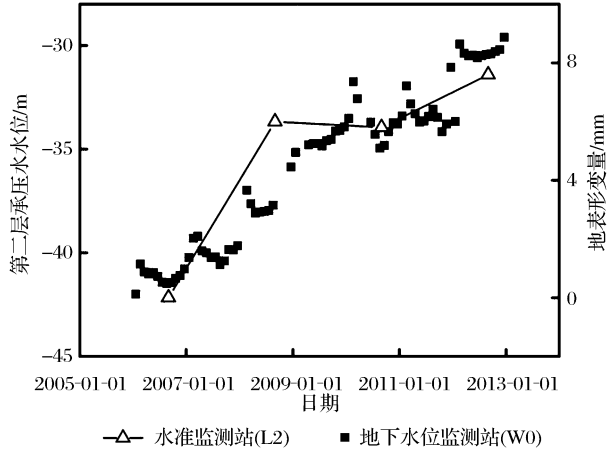


图 6 第二层承压水水位与水准数据的比较图
Fig.6 Comparison of the second confined water level and leveling data

新北区大部分地区基本呈现轻微地面回弹的现象,这与承压水位持续上升有关,新北区靠近长江(图 1),第二层承压水埋深较浅(图 6),承压水容易得到补给。然而京沪高铁—常州北站附近却出现一定程度的地面沉降(图 3),分析沉降原因可能是由于常州北站开始运营时间(2011 年 6 月 30 日)与影像最终获取时间(2012 年 7 月 14 日)间隔较短,前期工程施工造成地基松动以及地面载荷增加,土层自然压缩而造成地面沉降;沪宁高速作为中国最繁忙的高速公路,承受了极大的货运及客运压力,龙虎塘街道沪宁高速路(P1)呈现出的沉降趋势应该与路面载荷增加存在密不可分的关系。中心城区(钟楼区、天宁区和戚墅堰区)出现了轻微的地面回弹,与近年来地下水水位普遍回升有关,这也和缪晓图等^[18]和 Wang 等^[26]的研究结果在趋势上保持一致。武进区发生沉降的范围比较大,武进区以南,南夏墅街道、礼嘉镇和洛阳镇一带沉降比较严重。参考文献资料^[1,19,26-27]发现,近年来武进区工业发展迅速,地下水开采量较大,另外,武进区承压水埋深较深,地下水难以补给,造成了地下水水位持续下降从而导致地面沉降,房屋建筑(P2~P4)处在武进区的沉降区,其沉降原因也与沉降区地下水水位下降有关。

5 结 语

本文利用 COSMO-SkyMed 高分辨 SAR 数据,采用 SBAS-InSAR 技术,成功获取了常州地区地面形变序列以及常州地表形变空间分布图,对比水准

数据与 SBAS-InSAR 测量结果,精度验证表明利用 SBAS-InSAR 技术探测城市地表形变结果可靠。

根据水准数据和地下水水位观测结果,分析了常州市地表形变发生原因,第二层承压水位持续上升与地面回弹趋势保持高度一致,在大部分区域,承压水水位普遍上升仍然是造成地面回弹和地面沉降的主要因素,这也与常州城区实施地下水禁采和回灌措施有关。武进区依然存在比较严重地面沉降,这些地区地下水开采需要得到进一步监管。

在 SAR 影像数量较小,并采用 SBAS-InSAR 的情况下, COSMO-SkyMed 数据在城市区域的地表形变探测中效果比较理想,可以捕捉到小范围的地面沉降,对重点城市建筑群、高铁、轨道交通等重点目标的地面沉降监测有很好的示范作用。

参考文献 (References):

- [1] Yu Jun, Wang Xiaomei, Wu Jianqiang, *et al.* Characteristics of Land Subsidence and Its Remedial Proposal in Suzhou-Wuxi-Changzhou Area[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(2): 179-184. [于军, 王晓梅, 武健强, 等. 苏锡常地区地面沉降特征及其防治建议[J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 179-184.]
- [2] 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.
- [3] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, *et al.* On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978 ~ 2012), 1994, 99 (B10): 19617-19634.
- [4] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [5] 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.
- [6] Jebur M N, Pradhan B, Tehrany M S. Using ALOS PALSAR Derived High-resolution DInSAR to Detect Slow-moving Landslides in Tropical Forest: Cameron Highlands, Malaysia [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2013 (Ahead-of-Print): 1-19.
- [7] Atzori S, Hunstad I, Chini M, *et al.* Finite Fault Inversion of DInSAR Coseismic Displacement of the 2009 L'Aquila Earthquake (Central Italy) [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36, LIS305: 1-6.
- [8] 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.]
- [9] Liu Jinlong, Guo Huadong, Song Rui, *et al.* The Application of Multi-mode Radar to Mining Area Subsidence Monitoring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(4): 584-590. [刘金龙, 郭华东, 宋瑞, 等. 多模式雷达在矿区沉降监测中的应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(4): 584-590.]
- [10] Li Yongsheng, Zhang Jingfa, Li Zhenhong, *et al.* Land Subsidence in Beijing City from InSAR Time Series Analysis with Small Baseline Subset[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(11): 1374-1377. [李永生, 张景发, 李振洪, 等. 利用短基线集干涉测量时序分析方法监测北京市地面沉降[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(11): 1374-1377.]
- [11] Tang Yixian, Zhang Hong, Wang Chao. Study on the Subsidence in Suzhou Area based on PS-InSAR Technique[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 1015-1020. [汤益先, 张红, 王超. 基于永久散射体雷达干涉测量的苏州地区沉降研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 1015-1020.]
- [12] Lei Kunchao, Jia Sanman, Chen Beibei, *et al.* Land Subsidence Detection based on PS-InSAR in Langfang [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(6): 1114-1119. [雷坤超, 贾三满, 陈蓓蓓, 等. 基于 PS-InSAR 技术的廊坊市地面沉降监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 1114-1119.]
- [13] Calò F, Ardizzone F, Castaldo R, *et al.* Enhanced Landslide Investigations through Advanced DInSAR Techniques: The L'vancich Case Study, Assisi, Italy [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 142: 69-82.
- [14] Hu B, Wang H S, Sun Y L, *et al.* Long-term Land Subsidence Monitoring of Beijing (China) Using the Small Baseline Subset (SBAS) Technique [J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 3648-3661.
- [15] Liu Guoxiang, Chen Qiang, Luo Xiaojun, *et al.* Permanent Scatterers Radar Interference Theory and Methods [M]. Beijing: Science Press, 2012. [刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. 永久散射体雷达干涉理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [16] Yu Yong, Bian Zhengfu, Liu Zhenguo, *et al.* Preliminary Study on Monitoring Urban Surface Deformation with SBAS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(1): 133-136. [余勇, 卞正富, 刘振国, 等. SBAS 方法监测城市地表形变初步研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(1): 133-136.]
- [17] Ge Daqing, Wang Yan, Guo Xiaofang, *et al.* Surface Deformation Field Monitoring by Use of Small-baseline Differential Interferograms Stack [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(2): 61-66. [葛大庆, 王艳, 郭小方, 等. 利用短基线差分干涉纹图集监测地表形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(2): 61-66.]
- [18] Miao Xiaotu, Zhu Xingxian, Lu Meilan, *et al.* Groundwater Exploration from the Confined Aquiferous and Land Subsidence Control of Suxichang Area [J]. The Chinese Journal of Geological Haz-

ard and Control,2007,18(2):132-139.[缪晓图,朱兴贤,陆美兰,等.苏锡常地区Ⅱ承压水开采与地面沉降控制研究[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(2):132-139.]

[19] Zhang Luocheng,Chen Zhenguang,Wu Chuchai.Land Subsidence Problem and Its Control in Taihu Basin of South Jiangsu Province due to Overexploitation of Underground Water[J].Journal of Lake Sciences,2003,15(3):257-262.[张落成,陈振光,吴楚材.苏南太湖流域地下水过度开采引起的地面沉降及其防治对策[J].湖泊科学,2003,15(3):257-262.]

[20] Zhu Wei,Liu Fuchun.Surface Subsidence Observations and Results Analysis in Changzhou[J].Engineering of Surveying and Mapping,2008,16(6):54-57.[朱微,刘福春.常州市地表沉降观测与成果分析[J].测绘工程,2008,16(6):54-57.]

[21] Jia Hongguo,Liu Guoxiang,Zhang Rui.High-resolution TerraSAR-X Radar Interferometry and Its Application to Detecting Deformation of Engineering Structures[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2011,(5):51-54.[贾洪果,刘国祥,张瑞.高分辨率 TerraSAR-X 雷达干涉及其在工程形变探测中的应用[J].测绘通报,2011,(5):51-54.]

[22] Liao Mingsheng,Pei Yuanyuan,Wang Hanmei,*et al.*Subsidence Monitoring in Shanghai Using the PSInSAR Technique[J].Shanghai Land & Resources,2012,33(3):5-10.[廖明生,裴媛媛,王寒梅,等.永久散射体雷达干涉技术监测上海地面沉降[J].上海国土资源,2012,33(3):5-10.]

[23] Yang C,Zhang Q,Zhao C,*et al.*Monitoring Land Subsidence and Fault Deformation Using the Small Baseline Subset InSAR Technique:A Case Study in the Datong Basin,China[J].Journal of Geodynamics,2014,75:34-40.

[24] Eineder M,Hubig M,Milcke B.Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings,IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium '98,1998,1:83-87.

[25] Zhang Rong.Land Subsidence Analysis and Countermeasures in Changzhou City[J].Jiangsu Water Resources,2005,(11):36-37.[张蓉.常州市地面沉降分析及对策探讨[J].江苏水利,2005,(11):36-37.]

[26] Wang G Y,You G,Shi B,*et al.*Long-term Land Subsidence and Strata Compression in Changzhou,China[J].Engineering Geology,2009,104(1):109-118.

[27] Xie Youpeng,Cao Liyun,Xu Liang.Land Subsidence and Monitoring in Changzhou City[J].Urban Geotechnical Investigation & Surveying,2009,(6):103-105.[谢友鹏,曹黎云,徐良.常州市地面沉降及监测[J].城市勘测,2009,(6):103-105.]

Monitoring Surface Deformation in Changzhou City Using COSMO-SkyMed Data

Lin Hui,Ke Changqing

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,Nanjing University,Nanjing 210023,China)

Abstract:Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique has been successfully applied to monitor surface deformation in urban area with great potential and advantages. X band high resolution radar satellite was more sensitive than the C band and L band in the tiny surface deformation detection.COSMO-SkyMed high resolution SAR images which covered most area of Changzhou were selected to be processed,and the time series results of surface deformation by using the SBAS-InSAR method were successfully achieved.Leveling observation data was used to verify the results of InSAR.Using the historical underground water level data,we analyzed the impact of groundwater level change on surface deformation.The results show that:the leveling observed data had a good agreement with the InSAR results,the subsidence area mainly occurred in Wujin district,with the maximal subsidence exceed -40 mm , central urban districts exhibited a slight land rebound at $+5\text{ mm}$;groundwater level which continued to rise was consistent with land rebound trend,groundwater level change was still the main influencing factors of surface deformation in Changzhou.

Key words:Land subsidence;COSMO-SkyMed;SBAS-InSAR;Changzhou