

小基线集雷达干涉测量在无锡地面沉降监测中的应用^①

赵佳曼^② 柯长青^③ 陆燕燕 姚国慧

(南京大学地理与海洋科学学院 南京 210023)

摘 要 地面沉降是无锡较为显著的地质灾害之一,严重影响了城市基础设施建设,限制了经济社会的可持续发展。合成孔径雷达干涉测量技术(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。基于 ASAR、ALOS 及 COSMO 数据,采用小基线集方法(SBAS)对 2004-2012 年间无锡的地表形变进行了监测研究。结果表明,沉降区域主要发生在江阴市南部及惠山区,最大累积沉降量超过 -200mm。新吴区、滨湖区以及位于主城区的梁溪区出现了轻微的回弹现象,最大累积回弹量达到 +40mm。与水准测量数据对比显示,干涉测量结果与水准观测数据具有很好的一致性。地下水水位变化仍然是无锡地表形变的主要影响因素。2005 年地下水禁采任务完成后,无锡地面沉降有所减缓,但由于地下水恢复缓慢,所以沉降现象仍在发生。

关键词 地面沉降,小基线集方法(SBAS),合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR),地下水,无锡

0 引言

地面沉降是由自然因素、人为因素或二者共同作用所导致的地表高程发生变化的现象^[1]。地面沉降形成的内力主要是由地壳升降运动、地震、火山活动等自然原因造成的^[2]。而人类活动所引发的外力,如过度开采地下水、无节制开采地下矿藏等,则是导致地面沉降形成的主要原因^[3]。世界上,日本、荷兰、印尼等都相继出现过地面沉降群发性灾害。中国的苏锡常地区城镇众多,经济发达,现在是我国地面沉降灾害最为严重的地区之一。由于长期人为过量开采地下水,地面沉降已经严重影响到人们的正常生活,给经济建设带来了不必要的损失^[4]。因此,采用合理的监测手段获取地表沉降的范围和强度,分析地表沉降的原因,从而减弱和控制地面沉降给城市居民的生产生活带来的影响尤为重要。

一直以来,地表形变的观测方法主要是水准测量方法和 GPS 测量方法。但水准测量和 GPS 测量等传统测绘手段观测周期长、布设较大数量观测点的难度较大,对于监测面积较大、形变较小的地面形变来说效率不高,并且观测结果不能反映出大面积范围下的沉降结果。合成孔径雷达干涉测量技术(synthetic aperture radar interferometry, InSAR)将传统的 SAR 遥感技术与射电天文干涉技术相结合,是雷达遥感技术中一个新的突破。InSAR 技术对获取的雷达影像的相位进行处理,以获取高程或者地表形变信息。差分雷达干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)技术^[5]则是在 InSAR 技术的基础上发展而来,其结合已有的 DEM 数据和精密轨道数据,去除干涉图中由地面高程引起的地形相位和由平地效应引起的平地相位,从而得到由地表形变引起的形变相位。尹宏杰^[6]等利用 D-InSAR 方法,通过对 ALOS-PALSAR 数据的处理,成功获取了湖南省冷水

① 国家自然科学基金(41371391,41830105)资助项目。

② 女,1994 年生,硕士生;研究方向:遥感及其应用研究;E-mail: zhaojiaman@126.com

③ 通信作者,E-mail: kecq@nju.edu.cn

(收稿日期:2017-12-20)

江市锡矿山地区的地表形变图及沉降等值线图。但 D-InSAR 技术应用中会存在时间与空间去相关的问题^[7],因此产生了一些改进的时序干涉测量方法,例如永久散射体(permanent scatterers InSAR, PS-InSAR)方法^[8]及小基线集(small baselines InSAR, SBAS-InSAR)方法^[9]。PS-InSAR 方法将 InSAR 技术扩展到多时相的数据,其从处理遥感影像得到的干涉对中识别提取具有较强相干性和稳定散射特性的点(即 PS 点),提取出其相位进行差分干涉处理,从而得到 PS 点的干涉相位图。PS-InSAR 技术所获取的形变结果的精度可以高达毫米级。周朝栋^[10]等利用 PS-InSAR 方法,通过处理 31 景 ENVISAT ASAR 数据,得到了北京市平原区地面沉降的空间分布和时间序列的沉降规律。SBAS-InSAR 方法将所获得的遥感影像分成若干个组合,挑选出时间基线和空间垂直基线都小于设定阈值的小基线集合,从而提高时间分辨率,被普遍地应用在很多领域。朱猛^[11]等利用 SBAS-InSAR 方法,采用 27 景 ERS-2 SAR 数据,对苏州地区的 2007 – 2010 年间的地面沉降情况进行了监测分析。郭乐萍^[12]等同样利用 SBAS-InSAR 方法,通过对 16 景 ALOS 影像进行处理,分析了南京河西地区的沉降趋势,并且与水准观测数据进行了对比,精度验证结果良好。

本文通过 SBAS-InSAR 技术,使用 ASAR、ALOS 及 COSMO 三种 SAR 数据对无锡地区的地表形变进行监测研究,获取了无锡 2004 – 2012 年间地表形变的累积地表形变空间分布、年平均沉降速率空间分布及沉降的长时间序列变化,并对无锡地区的地面

沉降情况进行了分析。

1 研究区与数据

1.1 研究区

无锡位于江苏省南部、长三角经济圈,下辖梁溪区、锡山区、惠山区、滨湖区、新吴区及江阴市和宜兴市。由于影像覆盖区域主要在无锡主城区和江阴市,所以本研究的研究区域不包含宜兴市。并且在参考水准测量结果的基础上选择了 4 个监测点,分别为惠山区前洲街道(P1),锡山区东亭街道(P2),惠山区玉祁街道(P3),江阴市璜塘镇(P4),如图 1 所示。地形方面,无锡境内基岩出露很少,地势较低。地质条件方面,无锡属太湖冲积平原,赋存地下水的介质主要是第四系松散堆积物,共发育有四个含水岩组,其中第 II 承压水是地下水的主要开采层^[13]。20 世纪 50、60 年代,无锡社会经济飞速发展,工农业产值不断增大,进而对地下水的需求不断增长,导致人工集中大量开采地下水的现象。60 年代末及 70 年代间,无锡的梁溪区等中心地区地表形变加大。80 年代,整个无锡都形成了严重的地面沉降。从地质角度来说,集中过量开采地下水会导致地层压缩变形,地面不断下沉,从而形成地面沉降。2000 年以来,江苏省第九届人民代表大会提出了关于苏锡常地区限期禁采地下水的决定,无锡的地表形变现象得到了一定程度的缓解。然而,由于有些地区地下水水位恢复较慢,地面沉降现象存在滞后效应,所以无锡的地面沉降现象仍然存在。

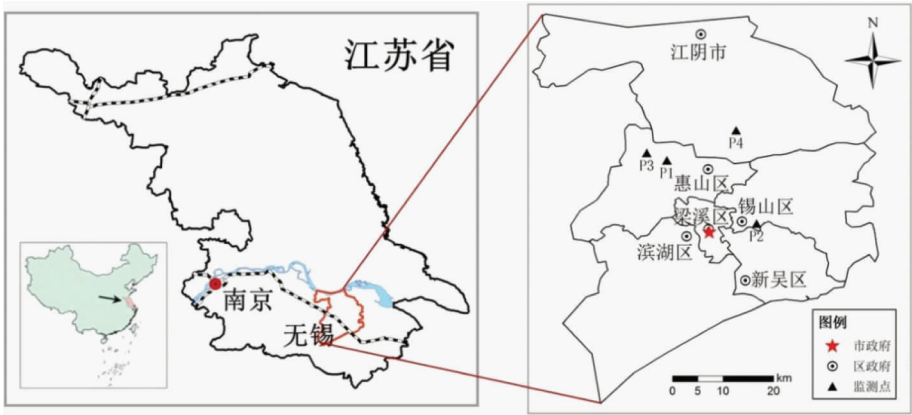


图 1 无锡的地理位置及水准监测点分布

1.2 雷达影像数据

使用 ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR 和 COSMO-SkyMed 3 种雷达数据(表 1)来获取无锡地表形变信息。由于一种数据的时间覆盖范围有限,综合使用 3 种数据可以延长地表形变监测的时间序列,其次所获取的 ASAR 与 ALOS 影像存在重叠日期的

数据,可进行结果间的交叉验证。为使 ALOS 和 COSMO 数据影像能覆盖整个研究区域,下载了覆盖多个区域的影像。获取的 ALOS 数据分别覆盖无锡地区东西两部分,获取的 COSMO 数据可以将覆盖的地区分为 a~e 等 5 个区域,如图 2 所示。

表 1 3 种 SAR 数据的参数、数据量与时间跨度

传感器	ENVISAT ASAR	ALOS PALSAR	COSMO-SkyMed
波段	C	L	X
波长 (cm)	5.6	23.6	3.1
入射角(°)	22.79	38.72	29.42
极化方式	VV	HH	HH
空间分辨率(m)	30	10	3
时间分辨率(d)	35	46	32
时间范围	2004.5.20 – 2010.4.29	2007.2.10 – 2011.1.6(东)	2011.7.24 – 2012.7.22(a、b、c)
		2007.1.12 – 2010.9.7(西)	2011.7.21 – 2012.7.14(d、e)

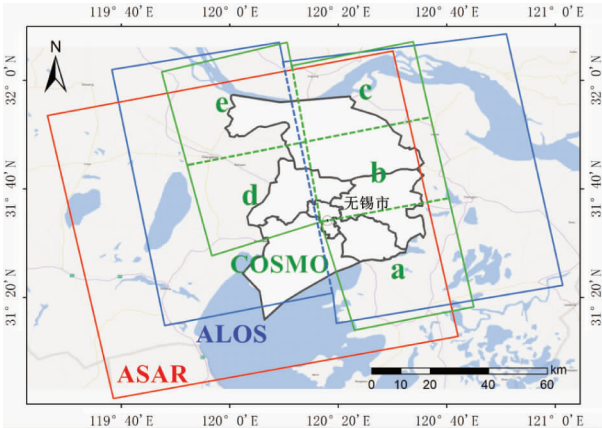


图 2 3 种 SAR 数据的覆盖范围

ENVISAT 卫星是欧空局发射的对地观测卫星系列之一,携带 C 波段合成孔径雷达(ASAR),获得的图像空间分辨率为 30m,时间分辨率为 35d,可以获得 2004 – 2010 年的影像数据。选取了 26 景影像数据,时间范围是 2004 年 5 月 20 日 – 2010 年 4 月 29 日。ASAR 影像及其时空基线详见附录 1。

ALOS 是日本发射的对地观测卫星,载有 3 个不同的传感器,其中 L 波段合成孔径雷达(PALSAR)获得的图像空间分辨率为 10m,时间分辨率 46d。L 波段穿透性较强,所以受水汽、植被影响较小。选取了 22 景 ALOS PALSAR 影像,覆盖无锡东

部的影像时间范围是 2007 年 2 月 10 日至 2011 年 2 月 21 日,覆盖无锡西部的影像时间范围是 2007 年 1 月 12 日至 2010 年 9 月 7 日。ALOS 影像及其时空基线详见附录 2。

高分辨率雷达卫星 COSMO-SkyMed 是意大利研发的,整个卫星星座由 4 颗 X 波段的合成孔径雷达(SAR)卫星组成,空间分辨率为 3m,时间分辨率 32d。因为 X 波段 SAR 对地面的微小形变比较敏感,所以用于监测城市的微小地表形变时效果较好。选取了 11 景 COSMO-SkyMed 影像,覆盖 a、b、c 区域的影像时间范围从 2011 年 7 月 24 日至 2012 年 7 月 22 日,覆盖 d 和 e 区域的影像时间范围从 2011 年 7 月 21 日至 2012 年 7 月 14 日。COSMO-SkyMed 影像及其时空基线详见附录 3。

水准数据来自江苏省地质调查研究院及地裂缝地质灾害重点实验室的监测数据,数据精度较高^[14]。数字高程模型(digital elevation model,DEM)的数据来自航天飞机雷达地形测绘(shuttle radar topography mission,SRTM)。该 DEM 数据基本覆盖了地球表面陆地总面积的 80%,分辨率为 90m。使用的版本 4 数据较以往有很大改进,采用了新的插值方法,数据质量较好。使用 DEM 来模拟地形相位,

在干涉相位图中作为地形相位成分去除。无锡拥有平坦的地势,地形起伏变化不大,使用较低分辨率的 DEM 即能达到实验要求。

2 方法

2.1 SBAS-InSAR 原理

SBAS 方法的原理是把所有遥感影像分成 N 个组合,得到多个小基线集合,再利用奇异值分解来联合求解若干个小基线集,从而获取最小范数下的最小二乘解,进而解决单个集合内时间采样不够的问题。SBAS-InSAR 方法能够获取时间序列上地表形变的动态演变,所以可以用较小时间和空间基线的干涉像对来进行地表形变的制图,同时也可以用于干涉像对来提取 DEM^[9]。

将一个区域内 K 景的 SAR 影像以时间的先后为标准进行排序($t_1, t_2, \dots, t_K$),并将影像配对。依据设置好的时间基线阈值和空间垂直基线阈值将满足条件的干涉对合并至同一个集合中,得到 N 组数据集,再利用差分干涉处理的方法获取差分干涉图(L 幅):

$$\frac{K}{2} \leq L \leq (K-1) \frac{K}{2} \quad (1)$$

消除平地效应和地形相位的影响后,在 $t_2 > t_1$ 的条件约束下,第 i 幅差分干涉图的差分干涉相位即:

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_{i2} - \phi_{i1} \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d_{i2} - d_{i1}] + \frac{4\pi}{\lambda} \times \frac{B_{\perp i} \xi}{R \sin \theta} \\ &\quad + [\phi_{atm2} - \phi_{atm1}] + \Delta \phi \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, ϕ_{i2} 和 ϕ_{i1} 为 t_2 和 t_1 时刻的相位, λ 为雷达波长, d_{i2} 、 d_{i1} 表示 t_2 、 t_1 下 LOS 向的形变大小(以初始时刻为参考对象), $\phi_{atm2} - \phi_{atm1}$ 表示大气延迟导致的相位差,表示垂直基线, R 表示卫星与地物目标间的距离, θ 表示卫星入射角, $\frac{B_{\perp i} \xi}{R \sin \theta}$ 为地形残差相位,表示噪声所导致的相位偏差。

建立形变和 DEM 残余相位误差的线性模型如下:

$$[T, M]P' = \delta \phi \quad (3)$$

式(3)中, T 表示受时间影响的稀疏矩阵, M 则表示受空间基线影响的系数矩阵。可利用式(4)求解 P' (线性形变相位):

$$P' = [v \ \xi]^T \quad (4)$$

式(4)中, v 表示线性形变的速率, ξ 表示 DEM 误差。

2.2 数据处理

采用瑞士 Sarmap 公司开发的高级雷达图像处理工具 SARscape 处理影像数据,基于 ENVI5.3 版本和 SARscape5.2.1 版本进行数据处理。首先,要对 SAR 影像进行像对的组合,得到多个小基线集合,生成差分干涉连接图。根据小基线选择原则,经多次实验尝试,对于 ASAR、ALOS 和 COSMO 影像,将空间基线设置为小于临界基线的 45% (分别约为 800m, 1600m 和 800m), 时间基线阈值皆设置为 400d。既能限制时空基线的大小,保证干涉效果,又能有足够的干涉相对组合。图 3 ~ 图 5 分别为所获得的 ASAR、ALOS 及 COSMO 数据生成的小基线干涉对分布图。在这一步所有辅影像都要与超级主影像进行精确配准,以得到高质量的干涉图。

接下来,根据像对的连接关系,对每一对像对进行干涉处理,可细分为 4 个步骤:干涉图生成、干涉图去平和去地形相位、干涉图滤波、相位解缠。配准完成后将所有干涉对进行共轭相乘,计算得到干涉相位图。再利用轨道参数估算出平地相位,利用外部 DEM 来模拟地形相位,从而去除干涉相位图中的平地相位和地形相位。采用 Goldstein 算法对干涉图进行滤波处理,采用 Delaunay 算法进行相位解缠。

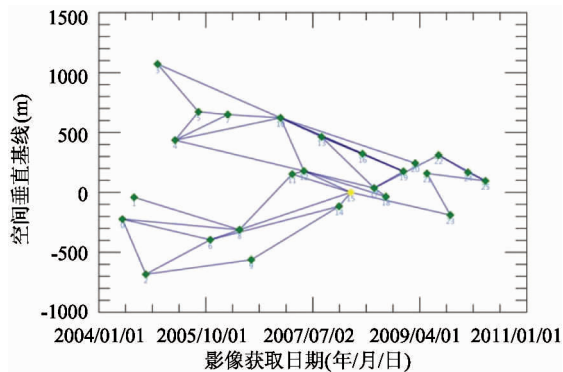


图3 ASAR 影像小基线干涉对分布

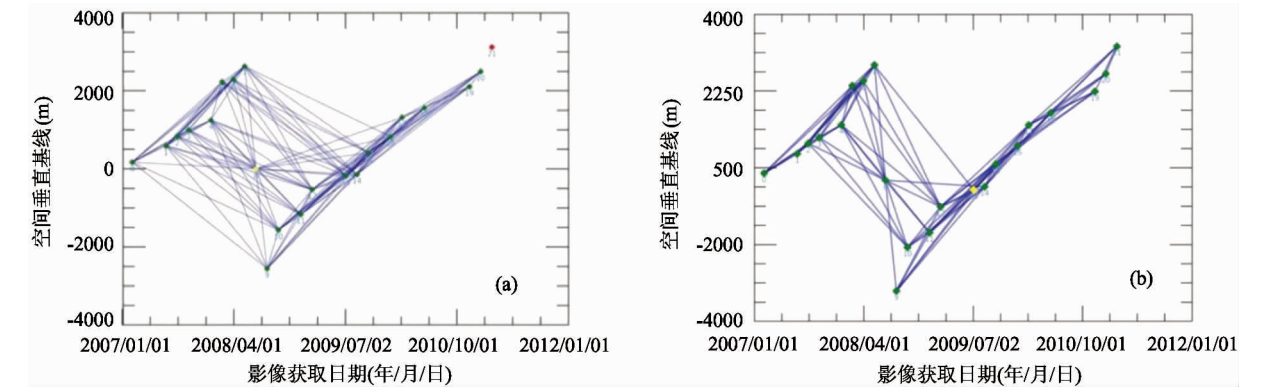


图 4 ALOS 影像小基线干涉对分布 (a 为东部, b 为西部)

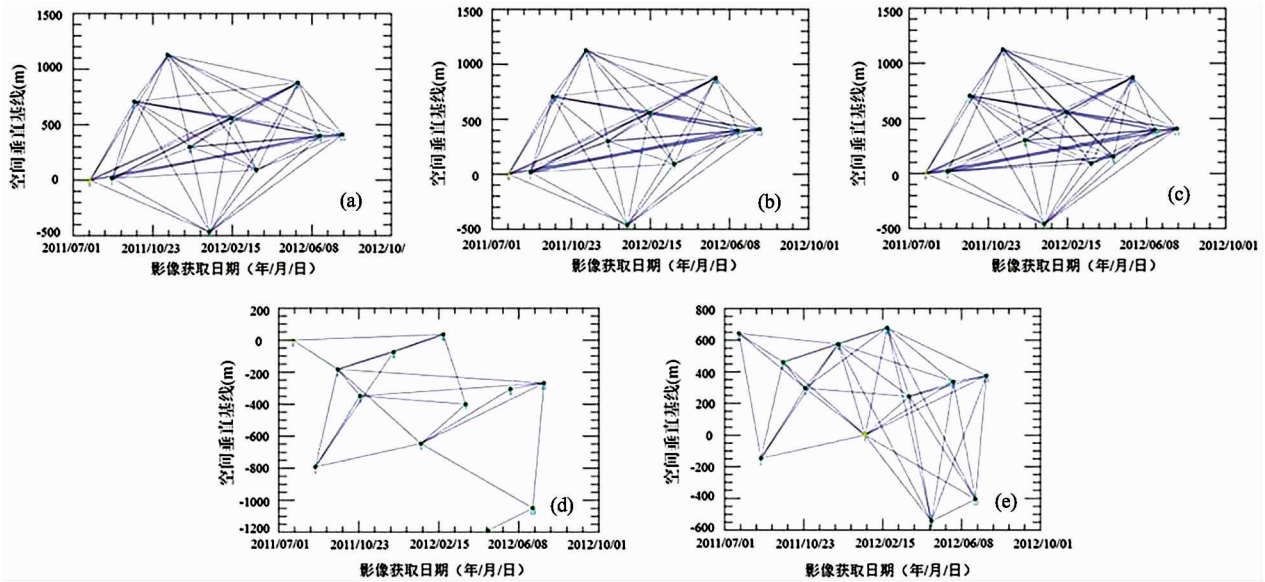


图 5 COSMO 影像小基线干涉对分布 (依次为 a, b, c, d, e)

处理结束后,需要通过查看相干性图和解缠结果图对像对进行检查,将相干性低的像对移除,以保证干涉图的质量。然后,选择相干性高、相位好的地面控制点(ground control point, GCP)来对干涉图进行轨道精炼和重去平。GCP 的选择非常重要,为保证处理结果的精度,要尽量选在没有形变的地方,避免选择出现相位跳变和残余条纹的地方。需要选择至少 20 至 30 个点来保证生成的 GCP 文件可以适用于多个像对中而不发生运行错误。接着要进行两次 SBAS 反演。第一次反演是对干涉图进行去平,重新进行相位解缠,是为了估算 DEM 校正系数和平均形变速率。第二次反演是为了提高结果的精度,去除残留的大气延迟相位,进而获得地表形变速率和每个时刻的形变量,即地表形变的时间序列。最后,要

进行地理编码,将雷达坐标系统转换成地理坐标格式的数据,以方便直观地反映研究区域的地面沉降信息。图 6 为数据处理流程图。

3 结果与讨论

3.1 地表形变空间分布

总体来看,无锡地表形变特征非常明显,地面沉降区集中在无锡西部和江阴市南部,即锡西-澄南地区。而中心城区则沉降不明显,以回弹为主(图 7)。ASAR 数据的结果显示了 2004 年至 2010 年间无锡 P1、P2、P3、P4 等 4 个监测点位的累积沉降量都高达 -120mm 左右。ALOS 数据展示了 2007 年至 2011 年的沉降累积量,无锡西部的惠山区前洲街道(P1)

和玉祁街道(P3)的累积形变量超过了-180mm,江阴市南部以璜塘镇(P4)为中心,沉降区域连成一片,累积沉降量达到-190mm。COSMO 数据只展示了2011年至2012年一年间的沉降累积量,因此沉降数值较小,约-20mm。反观地面回弹区域,分布范围较广,从无锡主城区的梁溪区至锡山区,再到新吴区都出现了一定程度的地面回弹,其中锡山区安镇回弹约+39mm。

2005年,无锡开始实施禁止开采地下水的政策,地面沉降得到了一定程度的控制,年平均沉降速率逐渐减慢(图8)。由于地下水位恢复缓慢,地面回弹存在一定的滞后性,所以沉降现象仍然存在。ASAR 数据监测显示,2004-2010年惠山区前洲街道(P1)的地表形变速率在-16mm/a左右,锡山区东亭街道(P2)和惠山区玉祁街道(P3)的地表形变速率在-18mm/a左右,江阴市璜塘镇(P4)的地表形变速率则在-20mm/a左右。至COSMO 数据监测到的2012年7月,前洲街道的沉降速率只有-2mm/a,东亭街道和玉祁街道的沉降速率控制在了-9mm/a左右,璜塘镇的沉降速率则降为-15mm/a,地面沉降明显减缓。

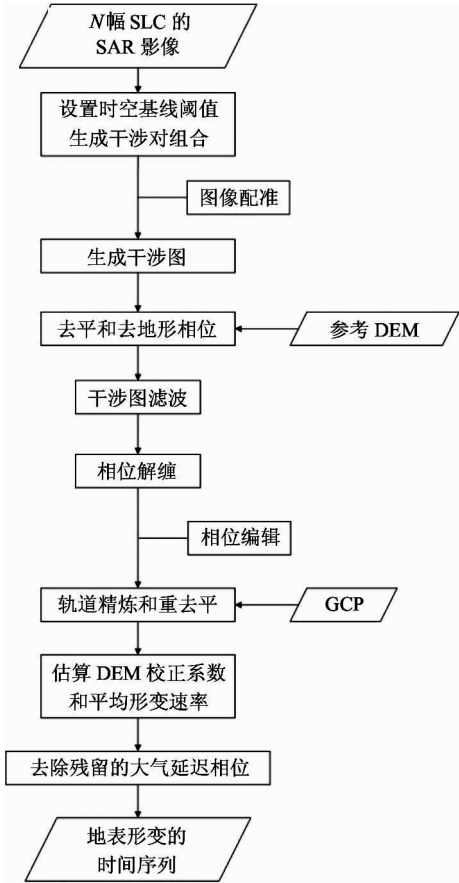


图6 SBAS-InSAR 技术处理流程图

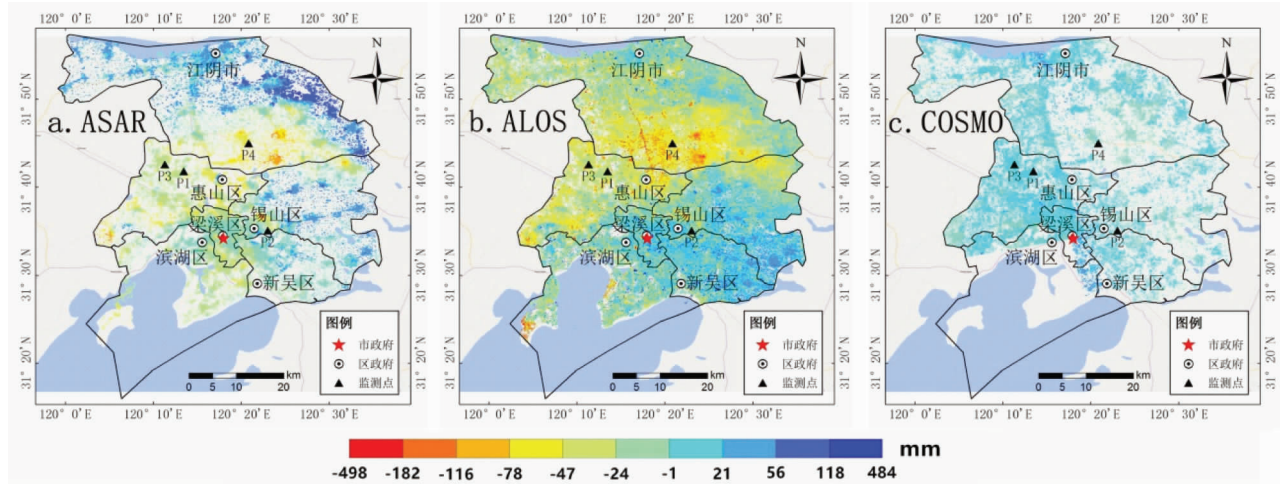


图7 无锡累积地表形变空间分布

3.2 地表形变长时间序列分析

将三种数据各自的时间序列合成长时间序列,可以观察整体的形变趋势。将ASAR数据与ALOS数据重叠部分(2007年3月至2010年3月)沉降值的平均值作为形变量,再将两种数据连接。使用插

值法补充ALOS数据与COSMO数据中间的空隔日期(2010年9月至2011年7月),再将两种数据连接。最后获得2004-2012年间ASAR、ALOS和COSMO 3种数据的长时间形变序列(图9)。图中显示沉降量虽呈现小幅波动,但趋势呈持续下降,累

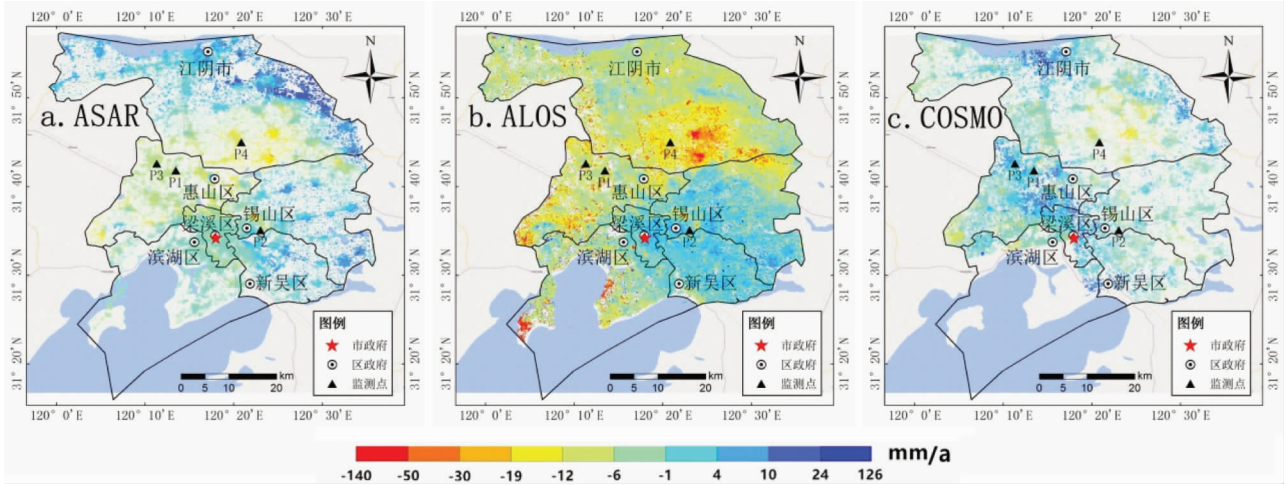


图 8 无锡年平均沉降速率空间分布

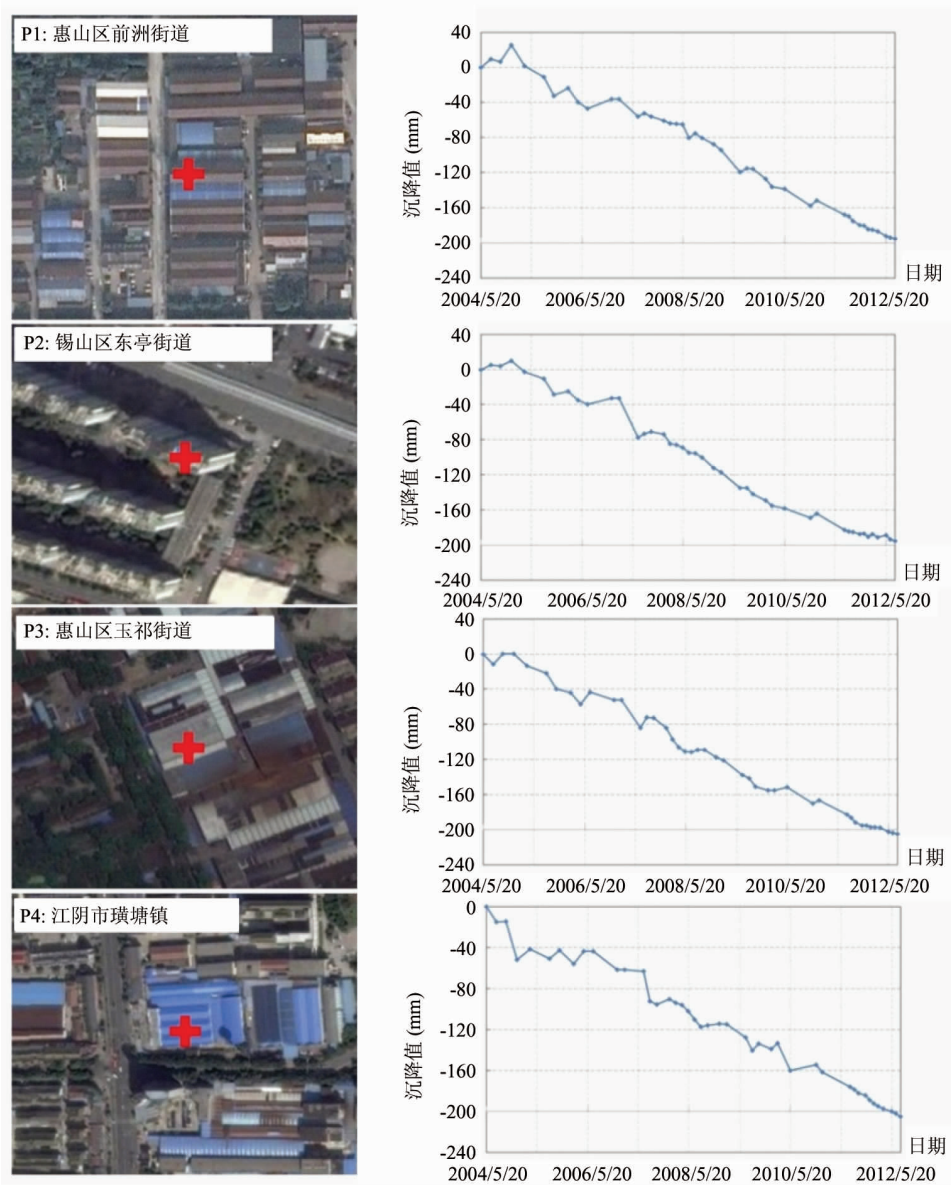


图 9 2004 – 2012 年无锡 4 个监测点的沉降变化

积沉降量都超过了 -200mm 。从 Google 地图中可看出,沉降主要发生在高密度建筑群,比如工厂厂房或是密集住宅区。2008 年之后沉降速率有所减缓,这与 2005 年开始实施禁止开采地下水的政策密切相关。

3.3 地表形变结果的验证

3.3.1 水准数据点与 SBAS-InSAR 结果对比

表 2 2005 年 SBAS-InSAR 累积沉降量与水准测量结果的对比

Points	P1 (惠山区前洲街道)	P2 (锡山区东亭街道)	P3 (惠山区玉祁街道)	P4 (江阴市璜塘镇)
水准测量 (mm)	-19	-12	-25	-15
SBAS-InSAR (mm)	-19	-11	-27	-14

3.3.2 ASAR 数据与 ALOS 数据的交叉验证

所获取的 ASAR 数据与 ALOS 数据存在 2007 年 3 月至 2010 年 3 月 3 年的重叠数据,因此可以根据这 3 年重叠数据进行 SAR 数据结果间的交叉验证。由于整个无锡地区数据量过大,于是选择典型的沉降较为严重的江阴市南部为分析区域,选择该地区 2007 年至 2010 年间的年平均沉降值为分析值,提取了近 3 万个点进行相关性分析。使用 MATLAB 软件对 ASAR 数据与 ALOS 数据所得到的结果进行线性相关性分析,得到散点图并拟合出趋势线(图 10)。结果显示 R^2 为 0.5568, $p < 0.001 < 0.05$,通过了 0.05 水平的显著性检验,证明虽然因传感器参数不同以及获取影像时气候条件不同等,两

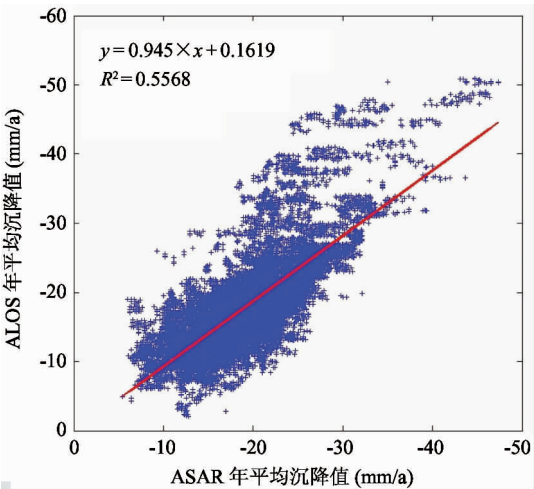


图 10 ASAR 与 ALOS 所得结果的相关性分析

通过水准监测站的经纬度,可以查询到该站的 SBAS-InSAR 测量值。将 InSAR 方法得到地表形变结果与水准监测数据^[15]相比较,发现两种方法得到的结果基本相同(表 2),误差在 $\pm 2\text{mm}$ 之间。精度验证结果表明,SBAS-InSAR 技术在应用于对地表形变的监测上时,精度能够达亚厘米级。

者结果并不完全相同,但两者存在线性相关关系。进而说明了 InSAR 技术运用在监测地表形变时是可靠的。

3.4 地表形变的原因

无锡位于长三角城市群,人口密集,城镇众多,经济发达,引起无锡地面沉降问题的原因,主要可以分为以下几个方面。首先,无锡的地层结构为地面沉降灾害孕育了内因条件^[15]。无锡第四纪地层广泛分布,在沉积过程中,由于多种因素的影响,土壤层发育有多层粘性土层和松散砂层^[16]。在长期人为过度开采地下水、而且开采时间与地点都非常集中的情况下,很容易导致区域地下水位持续下降,孔隙水压力降低,土层有效应力增加,无锡的松软土层极易被压缩产生形变,从而引起地表形变,这与薛禹群^[3]等人的研究结果一致。其次,无锡的沉降集中于锡西-澄南地区(图 7),主要是一些工厂区域及居民住宅区。工业生产区地面沉降的原因与人为的地下水过量开采密切相关,除此之外工业区新建建筑物较多,增加了地表荷载。居民区出现地面沉降的原因主要是住宅区高建筑物密度的增加和住宅房屋的加盖。随着无锡城市的快速扩张,建筑物不断加盖,地表荷载随之增加,同样会引发较为严重的地表形变。这与林辉^[2]等人的研究结果一致。所以城市化也是导致地表形变的一个间接外在原因。

2000 年江苏省颁布地下水禁采令,无锡地区禁止开采地下水后,地下水水位上升,但因为地表形变

具有一定的滞后效应^[14],所以地面沉降现象并没有完全停止。地下水补给较差的地区,水位恢复缓慢,滞后效应会比较长,地面沉降的现象会继续发生,但是沉降速度在逐渐缩小,比如目前仍存在沉降现象的锡西-澄南地区(图 7)。相反地,地下水补给条件较好的地区,地下水补给充足,水位恢复快,所以沉降的速率减缓也很快,再加上无大面积房屋加盖,这

些地区甚至出现回弹现象,比如无锡的东部及南部,即锡山区、新吴区和滨湖区等。这与胡建平^[15]等人的研究在趋势上一致。以同样的方法将 2004 - 2012 年间回弹区域的 ASAR、ALOS 和 COSMO 3 种数据沉降值连接起来,可以看出明显的回弹趋势,以 2008 年之后的趋势最为明显(图 11)。

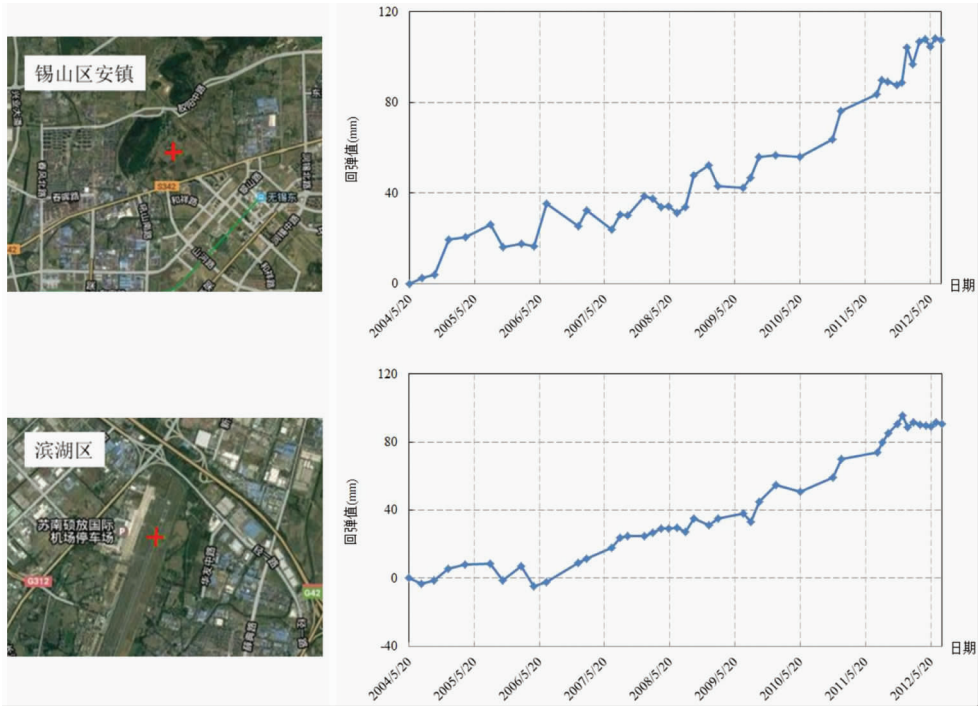


图 11 回弹区域长时间地表变形序列

4 结 论

基于 ASAR、ALOS PALSAR 及 COSMO 3 种数据,采用 SBAS-InSAR 技术,成功获取了无锡累积地表形变空间分布图、年平均沉降速率空间分布以及地表形变时间序列。精度验证表明,水准测量数据与 SBAS-InSAR 测量结果基本一致,ASAR 与 ALOS 之间互相验证结果良好,用 SBAS-InSAR 技术获取的地面沉降的结果精度可靠。无锡地面沉降现象主要发生在锡西-澄南地区,并呈现向东、向南沉降量逐渐减小的趋势。2004 - 2012 年江阴市璜塘镇的累积沉降量达到 -190mm。惠山区前洲街道、玉祁街道的累积形变量也超过了 -180mm。地面回弹主要发生在无锡市东部和南部,其中锡山区的安镇和滨湖区地面回弹量都在 +40mm 左右。无锡地面沉

降的发生主要有两个原因。一是地质环境条件,第四纪土层结构等是导致地面沉降发生的内在因素。二是人类活动的影响,长期人为大量开采地下水也是导致地面沉降现象发生的主要原因。另外,开发区、居民区建设等城市化的发展、建筑物的加盖同样也是影响地面沉降的一个间接外在因素。

由于时间范围、数据获取等方面的原因,本文研究还存在一些问题。一是水准测量数据较少,精度比较不够全面。后续可以结合更多的水准数据和 GPS 数据,对 SBAS-InSAR 技术得到的地面形变结果进行精度验证。二是可以再采用 PS 法进行地面沉降的监测,将两种方法得到的数据进行相互比较,分析不同技术的优劣性。最后,还可以继续收集补充一些地下水资料及城市发展等数据,进一步全面分析无锡地表形变的原因。

附录 1 ASAR 影像及其时空基线

编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)	编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)
1	2004/5/20	-223	-1365	14	2007/8/23	463	-175
2	2004/7/29	-41	-1295	15	2007/12/6	-116	-70
3	2004/10/7	-683	-1225	16	2008/2/14	0	0
4	2004/12/26	1071	-1145	17	2008/4/24	321	70
5	2005/3/31	435	-1050	18	2008/7/3	36	140
6	2005/8/18	672	-910	19	2008/9/11	-35	575
7	2005/10/27	-395	-840	20	2008/12/25	175	315
8	2006/2/9	649	-735	21	2009/3/5	243	385
9	2006/4/20	-312	-665	22	2009/5/14	158	455
10	2006/6/29	-562	-595	23	2009/7/23	310	525
11	2006/12/21	621	-420	24	2009/10/1	-189	595
12	2007/3/1	152	-350	25	2010/1/14	167	700
13	2007/5/10	178	-280	26	2010/4/29	95	805

附录 2 ALOS 影像及其时空基线

无锡东部				无锡西部			
编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)	编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)
1	20070210	169	0	1	20070112	-2191	-1012
2	20070628	586	138	2	20070227	-284	-966
3	20070813	832	184	3	20070715	276	-828
4	20070928	999	230	4	20070830	589	-782
5	20071229	1245	322	5	20071015	860	-736
6	20080213	2229	368	6	20080115	1292	-644
7	20080330	2293	414	7	20080301	1830	-598
8	20080515	2629	460	8	20080416	2139	-552
9	20080630	0	506	9	20080601	1933	-506
10	20080815	-2557	552	10	20080717	-648	-460
11	20080930	-1566	598	11	20081017	-1847	-368
12	20081231	-1168	690	12	20090117	-1306	-276
13	20090215	-531	736	13	20090304	-1136	-230
14	20090703	-174	874	14	20090419	-562	-184
15	20090818	-144	920	15	20090720	-796	-92
16	20091003	413	966	16	20090904	-302	-46
17	20100103	823	1058	17	20091020	0	0
18	20100218	1319	1104	18	20100120	92	414
19	20100521	1562	1196	19	2010307	138	937
20	20101121	2105	1380	20	20100607	230	1103
21	20110106	2493	1426	21	20100723	276	1342
22	20110221	3119	1472	22	20100907	322	1387

附录 3 COSMO-SkyMed 影像及其时空基线

a				b			
编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)	编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)
1	20110724	0	0	1	20110724	0	0
2	20110825	16	32	2	20110825	17	32
3	20110926	707	64	3	20110926	707	64
4	20111113	1129	112	4	20111113	1128	112
5	20111215	298	144	5	20111215	300	144
6	20120112	-468	172	6	20120112	-464	172
7	20120213	560	204	7	20120213	559	204
8	20120320	93	240	8	20120320	93	240
9	20120519	878	300	9	20120519	876	300
10	20120620	400	332	10	20120620	399	332
11	20120722	411	364	11	20120722	409	364

c				d			
编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)	编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)
1	20110724	0	0	1	20110721	0	0
2	20110825	17	32	2	20110822	-791	32
3	20110926	706	64	3	20110923	-182	64
4	20111113	1127	112	4	20111025	-348	96
5	20111215	302	144	5	20111212	-74	144
6	20120112	-460	172	6	20120120	-645	183
7	20120213	558	204	7	20120221	36	215
8	20120320	92	240	8	20120324	-400	247
9	20120421	153	272	9	20120425	-1189	279
10	20120519	874	300	10	20120527	-305	311
11	20120620	397	332	11	20120628	-1049	343
12	20120722	407	364	12	20120714	-268	359

e			
编号	成像日期	空间基线 (m)	时间基线 (d)
1	20110721	643	-183
2	20110822	-147	-151
3	20110923	461	-119
4	20111025	297	-87
5	20111212	576	-39
6	20120120	0	0
7	20120221	679	32
8	20120324	244	64
9	20120425	-544	96
10	20120527	338	128
11	20120628	-405	160
12	20120714	376	176

参考文献

- [1] 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
- [2] 林辉. 时序 InSAR 技术在常州市地表形变监测中的应用研究:[硕士学位论文][D]. 南京:南京大学地理与海洋科学学院, 2016
- [3] 薛禹群,张云. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J]. 华东地质, 2016, 37(1):1-9
- [4] 段光耀,刘欢欢,宫辉力,等. 京津城际铁路沿线不均匀地面沉降演化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017(12):1847-1853
- [5] 臧妻斌,黄腾,郭献涛. 基于 DInSAR 技术的意大利拉奎拉同震形变研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(1):52-57
- [6] 尹宏杰,王平. 基于 L 波段 DInSAR 的矿区形变研究[J]. 工程勘察, 2017, 45(2):64-67
- [7] 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
- [8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1):8-20
- [9] 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
- [10] 周朝栋,宫辉力,张有全,等. 北京平原区地面沉降 PS-InSAR 监测[J]. 遥感信息, 2017, 32(1):17-22
- [11] 朱猛,董少春,尹宏伟,等. 基于 SBAS InSAR 方法的苏州地区 2007-2010 年地表形变时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(10):1418-1427
- [12] 郭乐萍,岳建平,岳顺. SBAS 技术在南京河西地表沉降监测中的应用[J]. 测绘通报, 2017(3):26-28
- [13] 于军,束龙仓,温忠辉,等. 锡西—澄南典型地面沉降区地面沉降风险评价[J]. 地质学刊, 2012, 36(1):74-79
- [14] 武健强,吴曙亮,闵望,等. 苏锡常地区地面沉降防控最新进展评述[J]. 地质学刊, 2014, 38(2):319-323
- [15] 胡建平. 苏锡常地区地下水禁采后的地面沉降效应研究:[博士学位论文][D]. 南京:南京大学地球科学与工程学院, 2011
- [16] 施小清,冯志祥,姚炳奎,等. 苏锡常地区深层地下水禁采后土层变形特征分析[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5):1062-1071

Application of SBAS-InSAR technology in land subsidence monitoring in Wuxi

Zhao Jiaman, Ke Changqing, Lu Yanyan, Yao Guohui

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023)

Abstract

Land subsidence is one of the most significant geological disasters in Wuxi, which seriously affects the construction of urban infrastructure and limits the sustainable development of economy and society. Synthetic aperture radar interferometry technology (InSAR) has been successfully applied to urban surface deformation monitoring and has shown great potential and advantages. Based on ASAR, ALOS and COSMO data, small baseline subset method (SBAS) is used to monitor the surface deformation of Wuxi. The results show that the subsidence mainly occurs in Jiangyin City and Huishan District, and the maximum cumulative subsidence during 2004 – 2012 is more than –200mm. In Xinwu District, Binhu District and Liangxi District located in the main city, there is a slight rebound phenomenon, the maximum cumulative rebound is about +40 mm. Compared with the leveling data, the synthetic aperture radar interferometry (InSAR) measurement results are in good agreement with the leveling data. The change of groundwater level is still the main influencing factor of surface deformation in Wuxi. After the prohibition of groundwater exploitation in 2005, the land subsidence has slowed down, but it is still occurring due to the slow recovery of groundwater.

Key words: land subsidence, small baseline subset (SBAS), synthetic aperture radar interferometry (InSAR), groundwater, Wuxi