

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. 地球物理学报, 2012, 55(2):452-461, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.009.

Xu W B, Li Z W, Ding X L, 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. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2):452-461, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.009.

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

许文斌^{1,2}, 李志伟^{1,2*}, 丁晓利^{1,3}, 汪长城^{1,2}, 冯光财^{1,3}

1 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

2 湖南省普通高校精密工程测量及变形灾害监测重点实验室, 长沙 410083

3 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙

摘 要 美国南加州洛杉矶地区是自然和人为活动引起的地质构造活跃、石油及地下水抽取和回灌频繁的区域。本文利用 19 景 ENVISAT ASAR 降轨影像生成了 71 幅垂直基线小于 300 m、时间间隔小于 3 年的解缠差分干涉图, 并基于短基线集技术(SBAS), GPS 和地下水水位数据估计了该区域 2003 年 9 月~2009 年 8 月的地表时序形变及含水层贮水系数等物理参数。研究表明:(1)在 InSAR 干涉图中可以清楚的识别多处沉降明显的区域, 例如, 主要由于含水层地下水的抽取与回灌引起地表沉降的 Pasadena 盆地(~ -2.5 cm/a)、San Gabriel 流域(~ -2 cm/a)、San Bernardino 盆地(~ -2.5 cm/a)、Pomona-Ontario 盆地(~ -4 cm/a)和 Santa Ana 盆地(~ -2.5 cm/a), 以及由石油抽取引起地面形变的 Santa Fe Springs 区域(~ -1 cm/a)和 Wilmington 区域(~ -1 cm/a)等;(2)InSAR 时间序列形变与 GPS 投影在雷达视线方向上的形变结果具有较高的一致性, 平均形变速率差异的均方差为 0.39 cm/a;(3)InSAR 时间序列形变与含水层地下水位的变化基本一致, 并基于相关理论计算出了含水层的弹性贮水系数和非弹性贮水系数, 分析了含水层的形变机理。

关键词 InSAR, 短基线集, 地表形变, 地下水, 含水层贮水系数, 洛杉矶

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.009

中图分类号 P541

收稿日期 2011-06-23, 2012-01-04 收修定稿

Application of small baseline subsets D-InSAR technology to estimate the time series land deformation and aquifer storage coefficients of Los Angeles area

XU Wen-Bin^{1,2}, LI Zhi-Wei^{1,2*}, DING Xiao-Li^{1,3}, WANG Chang-Cheng^{1,2}, FENG Guang-Cai^{1,3}

1 School of Geosciences and Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2 Key Lab. of Precise Engineering Surveying & Deformation Hazard Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China

3 Dept. of Land Surveying & Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Abstract The Los Angeles area is a tectonically active region with a combination of natural and

基金项目 国家自然科学基金项目(40974006, 40774003), 香港研究资助局项目(PolyU5155/07E), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-08-0570), 国家西部 1:50000 空白区测图工程 2009 年度研究课题, 湖南省高校创新平台开放基金项目(09K005, 09K006), 中南大学研究生教育创新工程项目(2009ssxt179)资助。

作者简介 许文斌, 男, 1985 年生, 硕士, 研究方向为 InSAR 大气改正和 InSAR 监测地表变形。

* **通讯作者** 李志伟, 男, 1974 年生, 中南大学“升华学者”特聘教授, 主要从事 InSAR 研究. E-mail: zwli@mail.csu.edu.cn

anthropogenic deformations, such as, fault related tectonics, oil and groundwater recharge and discharge. In this paper, we process a dataset of 19 descending ENVISAT ASAR images acquired between September 2003 and August 2009 over Los Angeles and generate 71 differential interferograms, which are characterized by perpendicular baseline smaller than 300m and time interval less than 3 years. Based on Small Baseline Subsets (SBAS) D-InSAR technique, we estimate the time series land deformation of this area. With the additional GPS and groundwater data, we further estimate the aquifer storage coefficients. The results show that: (1) a couple of deformation evident regions can be easily identified from the interferogram, including the aquifers compaction related subsidence area such as Pasadena basin (~ -2.5 cm/a), San Gabriel valley (~ -2 cm/a), San Bernardino basin (~ -2.5 cm/a), Pomona-Ontario basin (~ -4 cm/a) and Santa Ana basin (~ -2.5 cm/a), and the oil extraction related area such as Santa Fe Springs (~ -1 cm/a), Wilmington (~ -1 cm/a) and so on; (2) InSAR-derived and LOS-projected GPS deformation velocity show a very good consistency, with a RMS difference of 0.39 cm/a; (3) InSAR deformation time series and groundwater level variations are in good agreement. Based on the theory of poroelasticity, we calculate the elastic and inelastic skeletal storage coefficient and analyze the deformation mechanisms of aquifer system. Keywords InSAR, SBAS, Ground Deformation, Groundwater, Aquifer Storage Coefficient, Los Angeles

Keywords InSAR, SBAS, Ground Deformation, Groundwater, Aquifer Storage Coefficient, Los Angeles

1 引言

美国南加州洛杉矶地区分布了许多断层,如 Newport-Inglewood 断层, Chino 断层, Raymond 断层等. 这些断层在一定程度上可以阻止地下水的运动,造成区域局部长时间的沉降、抬升或地表季节性的形变^[1]. 由于太平洋板块和北美洲板块的运动造成南加州南北方向的压缩,使得该区域成为全世界地壳运动最为活跃的区域^[2]. 1994 年, M_w 6.8 级的 Northridge 地震给洛杉矶造成了巨大的人员伤亡和财产损失^[3]. 此后,越来越多的 GPS 监测站在洛杉矶建立起来,逐渐成为全球空间分布最密集的 GPS 网之一,称为南加州综合 GPS 网 (SCIGN). 虽然 GPS 能够高时间分辨率、高精度的提供地面三维形变测量结果,但是它的空间分辨率较低 (≥ 10 km), 不利于提供空间上较为详尽的地表形变信息.

作为一种与 GPS 互补的测量技术, InSAR 可以高空间分辨率、高精度的监测地表形变^[4]. 通过 InSAR 监测地表时序形变,可以更加详尽地揭示区域地表随时间的变化以及理解地表形变动力学的一些规律. 然而 InSAR 的观测周期大约为 1 个月,而且干涉图记录的是某个时间段内的形变. 因此,要采用一定的办法将这些分散的干涉图有机的连接起来形成一个时间序列. 目前,应用较广泛的是永久散射

体技术 (PS 技术)^[5] 和短基线集 (SBAS) D-InSAR 技术^[6]. 其中, PS 技术需要大量的 SAR 影像 (大于 20 幅), 而且只能生成时序上能够保持相位稳定的点目标的形变, 所以像素密度不高. 而 SBAS 技术采用短基线干涉组合进行测量, 有效地减弱了空间基线引起的失相干问题; 同时由于满足短基线条件的所有干涉图都参与了解算, 而且引入了奇异值分解方法 (SVD), 可以获得观测时间序列最小范数解, 提高了解的稳定性和可靠性. 因此, 作为 D-InSAR 的后处理技术, SBAS 更实用更可靠.

以往对洛杉矶区域地表形变的研究采用的数据主要来源于 ERS1/2, 且主要集中在研究 2002 年以前地面形变情况^[5,7-9]. 例如, Ferretti 等^[5] 指出 Pomona-Ontario 盆地 1992 年 6 月至 1999 年 1 月的累积最大沉降量约为 20 cm, Bawden 等^[9] 的研究表明 Santa Ana 盆地由于含水层地下水位的变化引起长期 12 mm/a 的沉降并伴随着季节性的变化, 其他一些研究者则研究了其他含水层, 如 Santa Fe Springs 区域^[1]、San Gabriel 流域^[10] 以及 San Bernardino 盆地^[11] 等地的地表形变. 在国内, 利用 D-InSAR 和 PSInSAR 技术监测地下水开采与地表形变有关的研究工作已经取得了一些进展, 如王超等^[12] 用 D-InSAR 技术监测了苏州地区的地面沉降; 张勤等^[13] 综合 InSAR 和 GPS 分析了西安的地表沉降和地裂缝时空形变特征; 刘国祥等^[14]、王艳等^[15] 利用

PSInSAR 获取了上海地区地表时间序列形变等,但鲜有采用 SBAS D-InSAR 技术估计地下水开采与地表形变以及估算含水层物理参数的研究工作. 叶叔华和黄斌^[16]阐述了包括 InSAR 在内的空间技术在地下水变化监测方面的巨大前景,并建议我国抓住机遇,尽早启动相关研究. 本文将采用 2003 年 9 月至 2009 年 8 月的 ENVISAT ASAR 数据和 SBAS D-InSAR 技术对该区域进行研究,通过与 GPS 测得的形变和地下水水位变化进行比较,借以调查该时间段内的地表形变情况、评估 SBAS 的监测精度、估算含水层的贮水系数及分析含水层的形变机理.

本文的研究内容有三个方面:第一,基于 SBAS 技术生成洛杉矶区域的地表时序形变速率图;第二,分析形变特征,并与 GPS 投影在雷达视线(LOS)方向的形变结果进行比较;第三,利用 InSAR 的形变结果与地下水水位变化估算相应含水层的骨架贮水系数,分析含水层的形变机理.

2 数据分析方法

2.1 短基线集 D-InSAR 技术

SBAS D-InSAR 技术是一项能够将多幅解缠后的差分干涉图通过奇异值分解方法生成平均形变速率图和形变时间序列图的技术. 本节仅简要介绍 SBAS 的一些关键步骤,关于 SBAS 的详细介绍可以参考文献[6].

SBAS 的基本步骤如下:

(1) 获取同一区域按照时间顺序(t_0, \dots, t_N)排列的 $N+1$ 幅 SAR 影像,选取其中一幅影像作为主影像并将其他 SAR 影像配准到这幅影像上,使其具有同样的空间格网.

(2) $N+1$ 幅 SAR 影像生成 M 幅多视差分干涉图. 需要注意的是每一幅解缠后的差分干涉图都已经通过图中某个稳定区域或者形变量已知的参考像素点进行绝对校正.

(3) 对于从影像 t_A 和主影像 t_B ($t_B > t_A$) 时刻获取的 SAR 影像生成的第 j 幅差分干涉图,方位向坐标为 x 和距离向坐标为 r 的像素的干涉相位可以写成:

$$\begin{aligned} \delta\phi_j(x, r) &= \phi_B(x, r) - \phi_A(x, r) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] + \Delta\phi_j^{\text{topo}}(x, r) \\ &\quad + \Delta\phi_j^{\text{atm}}(t_B, t_A, x, r) + \Delta n_j(x, r), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $j \in (1, \dots, M)$, λ 是信号的中心波长, $d(t_B,$

$x, r)$ 和 $d(t_A, x, r)$ 是 t_B 和 t_A 时刻相对于 $d(t_0, x, r) = 0$ 的雷达视线方向(LOS)的累积形变量. $\Delta\phi_j^{\text{topo}}(x, r)$ 表示差分干涉图中残余的地形相位,本文采用 1 弧秒的 SRTM DEM(空间分辨率约为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,精度约为 7 m ^[17])可以有效地降低干涉图中地形信息,由于大部分干涉图的垂直基线小于 200 m , 7 m 的误差在 200 m 基线下对 LOS 变化的贡献约 4 mm ,因此在 SVD 计算中忽略差分干涉图中的残余地形信息. $\Delta\phi_j^{\text{atm}}(t_B, t_A, x, r)$ 为两次成像期间,不同的大气状态对雷达相位的延迟影响. 由于本文采用的 ENVISAT ASAR 数据,所以对于满足无云条件的干涉图可以利用 MERIS 水汽数据进行大气改正. 通过以往的研究作者发现:对于南加州地区,选取的 4 幅干涉图经过 MERIS 水汽数据改正后 InSAR 与 GPS 差异的 RMS 平均改善程度达 41.4% ^[18]. 然而由于 MERIS 对于薄云的识别不是很精确,进行大气改正后可能会引入一些误差. 此外,由于大气校正主要是改正长波段的大气影响,因此可能会损失一些长波段的形变信号. 将改正后的干涉图用于 SBAS 计算,从而降低大气对干涉图的影响. 对于不满足无云条件的干涉图,不做大气改正. $\Delta n_j(x, r)$ 则表示去相干噪声(如系统热噪声等). 所以可以将(1)式简化为

$$\begin{aligned} \delta\phi_j(x, r) &= \phi_B(x, r) - \phi_A(x, r) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)]. \end{aligned} \quad (2)$$

(4) 根据文献[6],为了获得物理上有意义的解,将(2)式中的相位表示为两个获取时间之间的平均相位速度:

$$v_j = \frac{\phi_j - \phi_{j-1}}{t_j - t_{j-1}}, \quad (3)$$

那么第 j 幅干涉图的相位值可以写成:

$$\sum_{k=t_{A,j}+1}^{t_{B,j}} (t_k - t_{k-1}) v_k = \delta\phi_j, \quad (4)$$

即各时段速度在主、从影像时间间隔上的积分. 写成矩阵形式为

$$\mathbf{B}v = \delta\phi. \quad (5)$$

式(5)是一个 $M \times N$ 的矩阵,将 SVD 应用于矩阵 \mathbf{B} , 就可以得到速度矢量的最小范数解,最后通过各个时间段内速度的积分就可以得到各个时间段的形变量.

2.2 含水层形变及物理参数估计

含水层系统主要由含水层和隔水层组成. 根据有效应力原理^[18],即总应力 σ_T 等于含水层的孔隙

应力 p 与隔水层有效应力 σ_e 之和

$$\sigma_T = \sigma_e + p. \quad (6)$$

当人为抽取地下水时,含水层的水位会随之降低,如果假设 σ_T 不变,则 p 减小, σ_e 增大,从而引起隔水层粒间骨架的压缩,地表发生沉降. 如果 σ_e 小于最大历史有效应力 $\sigma_{e(\max)}$, 则含水层系统压缩是弹性的,沉降可以恢复. 当含水层回灌的时候,地下水水位上升,则 p 增大, σ_e 减小,隔水层粒间骨架扩张,含水系统弹性抬升. 如果长期从含水系统抽取地下水而不能给予含水层足够的补充,那么 σ_e 持续增大,当 σ_e 大于最大历史有效应力时,将造成纹理致密的隔水层孔隙结构重组,从而致使孔隙容量永久性的减小,压缩隔水层,引起含水层非弹性形变,造成地表永久性的沉降. 不同的含水层形变行为通常描述成两个不同的骨架贮水系数:

$$S_{ke}^* = \frac{\Delta b^*}{\Delta h}, \sigma_e < \sigma_{e(\max)}$$

$$S_{ki}^* = \frac{\Delta b^*}{\Delta h}, \sigma_e > \sigma_{e(\max)} \quad (7)$$

其中, S_{ke}^* 表示含水层弹性骨架贮水系数, S_{ki}^* 表示含水层非弹性骨架贮水系数. 它们反应了在含水层系统中,含水层和隔水层对地下水水位变化的反映,是影响地下水不稳定流动的关键水力学参数,对于评估地下水资源非常重要^[19-20]. Δb^* 表示含水系统厚度的变化,可以通过 InSAR 时序形变图计算得到; Δh 表示地下水水头的变化,可以通过观测水井地下水水位变化得到.

3 实验研究与讨论

3.1 实验数据

本文实验采用 2003 年 9 月 27 日至 2009 年 8 月 1 日期间 19 景 ENVISAT ASAR 降轨数据. 这些降轨影像覆盖美国南加州洛杉矶区域 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的空间范围,具体参数见表 1. 基于这些数据,我们利用 GAMMA 软件处理生成了 71 幅垂直基线小于 300 m、时间间隔小于 3 年的多视差分干涉图. 在干涉处理过程中,采用欧洲空间局的精确 DORIS 轨道(从 ESA ESRIN ftp site 下载),以提高影像配准精度、平地效应去除精度以及地形、轨道等残余系统相位的拟合和去除精度. 为了抑制相位噪声,在生成干涉图的时候,距离向和方位向分别做 4 视和 20 视的多视处理以降低数据存储量和提高程序的运算速度,并采用改进的 Goldstein 滤波法^[21]

对生成的干涉图进行滤波,以提高干涉图的质量. 地形相位的去除采用 1 弧秒的 SRTM DEM,再利用最小费用流法(MCF)对差分干涉图进行相位解缠,最后根据参考 GPS 站点 ELSC 的观测值校正差分干涉图,并假定 2003 年 9 月 27 日的地表形变为 0 m.

表 1 ASAR 数据参数

Table 1 Basic parameters of ASAR dataset

卫星	轨道号	年-月-日	垂直基线
ENVISAT	8240	2003-09-27	-293
ENVISAT	12749	2004-08-07	-83
ENVISAT	17258	2005-06-18	240
ENVISAT	18260	2005-08-27	565
ENVISAT	18761	2005-10-01	-260
ENVISAT	19763	2005-12-10	0
ENVISAT	21266	2006-03-25	201
ENVISAT	21767	2006-04-29	240
ENVISAT	24773	2006-11-25	164
ENVISAT	25274	2006-12-30	343
ENVISAT	26276	2007-03-10	393
ENVISAT	26777	2007-04-14	-204
ENVISAT	27278	2007-05-19	-110
ENVISAT	27779	2007-06-23	-16
ENVISAT	28280	2007-07-28	-86
ENVISAT	29282	2007-10-06	-186
ENVISAT	29783	2007-11-10	160
ENVISAT	37799	2009-05-23	11
ENVISAT	38801	2009-08-01	-94

GPS 数据则从南加州综合 GPS 网(SCIGN, <http://www.scign.org>)上下载. 至今 SCIGN 已经完成了超过 250 个 GPS 站点的建设,它的主要目的就是实时的监测南加州区域地表的三维形变. 由于 InSAR 只能测得一维形变量(即视线方向的形变),我们必须先把 GPS 测得的三维形变投影到雷达视线(LOS)方向. 投影公式为^[22]:

$$\Delta L = [\sin(\theta_{inc})\sin(\alpha)$$

$$-\sin(\theta_{inc})\cos(\alpha) \quad \cos(\theta_{inc})] \begin{bmatrix} \delta_N \\ \delta_E \\ \delta_U \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 ΔL 是雷达两次成像间地表在 LOS 方向的形变量; α 代表卫星航向的方位角(从北方向开始,顺时针方向为正); θ_{inc} 代表雷达入射角; $\delta_N, \delta_E, \delta_U$ 分别为 GPS 站点在北方向、东方向和垂直方向的形变量,通过下载两次成像时刻 SCIGN 网的 GPS 精密

定位结果并进行差分得到。

地下水资料从美国地质调查局(USGS)地下水信息网站下载。同样的,为了将 InSAR LOS 方向形变结果与地下水水位变化进行比较,需要将 D-InSAR LOS 方向的形变量利用雷达入射角的余弦关系投影到垂直方向上。

3.2 洛杉矶地表时序形变结果

根据 2.1 节描述的步骤,利用 SVD 方法将 71 幅差分形变干涉图连接起来,解算了 2003 年 9 月至 2009 年 8 月的平均形变速率图,见图 1 所示。从图中可以看到,该区域地表形变整体呈沉降的趋势,其中人为因素(如地下水、石油的抽取与回灌)引起的地表形变显而易见,并能清楚的识别出 7 处形变明显的区域。其中,Santa Ana 盆地、Pomona-Ontario 盆地、San Bernardino 盆地、Pasadena 盆地和 San Gabriel 流域包含该区域的主要含水层,而 Santa Fe Springs 和 Wilmington 区域的形变主要与石油的开采有关,这 7 处沉降最明显的区域与已有的研究结果在空间范围和沉降幅度均具有较高的一致性^[1,5,7-9]。含水层引起的地表沉降较油田引起的地表沉降明显,形变量最大处发生在 Pomona-Ontario 盆地,而 Santa Fe Springs 和 Wilmington 油田区域的形变量相对较小。

Newport-Inglewood 断层、Chino 断层和 Raymond 断层的存在,阻碍了地下水的流动,从而限制了含水层形变范围的扩张。分析断层两端差别明显的地表形变,我们推测该形变与构造运动无关,主要由于人为因素引起。因为地质构造运动一般会使断层两端的地表都产生形变而不仅限于发生在断层的某一端;另外,地下水的抽取与回灌引起的地表形变一般是空间连续的,而且是小范围的形变;而构造运动引起的地表形变一般是大范围的,可能在空间上不连续^[23]。因此,从图 1 中的形变条纹样式来看,我们推测研究区域的地表形变主要与含水层的形变有关,因此忽略区域内的地质构造运动的影响。

特别的,我们分别选取其中形变最为明显的 3 个区域:Santa Fe Springs 区域,Pomona-Ontario 盆地和 San Bernardino 盆地的剖面进行分析(剖面位置见图 1),结果见图 2(a-c)。

从图 2(a-c)可知,在 2003 年 9 月 27 日至 2009 年 8 月 1 日时间段内,含水层和油田的地表形变主要表现以沉降为主的趋势,其中,2003 年 9 月至 2006 年 11 月的沉降量较小,与山体径流和异常的冬季降雨有关^[10-11],Lu 等^[11]的研究也监测到了相

似的地表形变现象,而 2006 年 11 月至 2009 年 8 月地表沉降加快,沉降量较大。图 2a 显示油田 Santa Fe Springs 相对于周围区域约抬升 1 cm/a,与气体的回灌有关^[11],但由于地表总体沉降大于抬升,所以仍表现为沉降的趋势(约 -1 cm/a);图 2b 揭示 Pomona-Ontario 盆地存在两个明显的沉降区,其中位于 Pomona 区域的沉降漏斗形变量最大(约 -4 cm/a),而且呈现逐年下降的趋势,结合该区域已有的研究结果^[1,5,7-9],在不考虑地壳运动影响的前提下,推测该含水层在这 6 年期间,地下水的抽取大于回灌,因此不能排除该含水层是否已经发生了不可恢复的非弹性压缩的可能性;图 2c 则反映了 San Bernardino 盆地的沉降范围逐年扩大,其沉降趋势与 Pomona-Ontario 盆地十分相似,但是沉降幅度稍小,大约为 -2.5 cm/a。

3.3 InSAR 和 GPS 结果比较

考虑到本文的主旨是利用 SBAS 技术和地下水位变化获取含水层的物理参数,在本节中将简要比较 SBAS D-InSAR 获取的时序地表形变与均匀选取的 10 个 GPS 投影在 LOS 方向的形变并评价 SBAS 的监测精度。如图 3 所示,红色的三角形表示 SAR 影像获取时刻的累积形变值,黑色星号表示投影在 LOS 方向的 GPS 形变结果。值得注意的是,GPS 测得的形变代表一个点的形变,而 InSAR 测得的形变代表一个分辨单元内的平均形变,如果地表形变不剧烈,可以认为两者近似相等。本文选取的是与 GPS 站最近的点做比较。

为了定量评价 SBAS D-InSAR 的监测精度,计算了 SBAS D-InSAR 与 GPS 投影在 LOS 方向的平均形变速率的差异(见表 2)。从表 2 可以看出 SBAS D-InSAR 与 GPS 计算的速率差异在 -0.21 到 -0.71 cm/a,均方误差为 0.39 cm/a。

3.4 洛杉矶地区含水层物理参数估计

从 2.2 节可知,高时空分辨率的地下水水位变化和 InSAR 时序地表形变结果可以用来计算含水层的骨架贮水系数和估计其分布范围。对于洛杉矶地区,我们从 USGS 地下水信息网站上下载了 2003 年至 2010 年 3 处地下水水位高程数据。其中位置名为 001S010W07R002S 的地下水井位于 San Gabriel 流域(简称,Site65),位置名为 001S004W20H001S(简称,Site55)和 001S004W08E003S(简称,Site66)的地下水井位于 San Bernardino 地区。

由于 InSAR 测量的是 LOS 方向上的地表形变,因此,为了将 InSAR 形变结果与地下水水位变

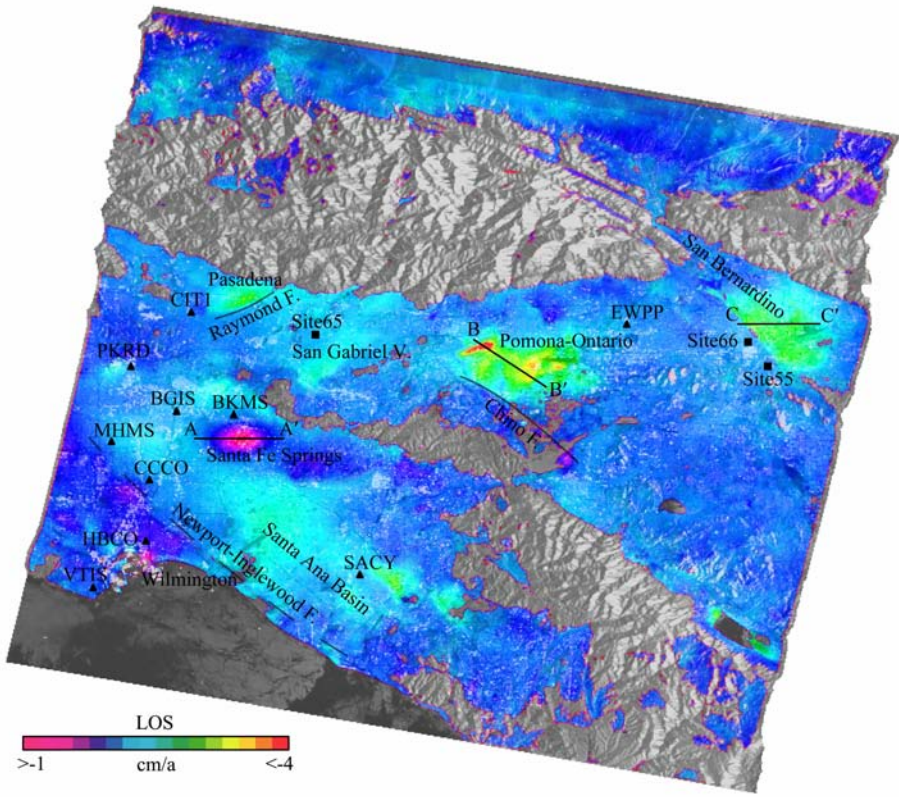


图 1 美国洛杉矶地区 2003 年 9 月 27 日至 2009 年 8 月 1 日雷达视线方向的平均形变速率图
底图为 SAR 灰度图 A-A', B-B' 和 C-C' 是选取的 3 个地表形变明显的剖面, 将作进一步分析。

图中黑色三角形表示 GPS 站点, 黑色矩形为地下水井位置。

Fig. 1 InSAR mean LOS deformation velocity map superposed on the SAR amplitude map over Los Angeles metropolitan, during the period from September 27, 2003, to August 1, 2009
Profiles A-A', B-B' and C-C' over deformation area are selected for further analysis. Black triangles denote the location of GPS stations, black rectangles are the location of groundwater wells.

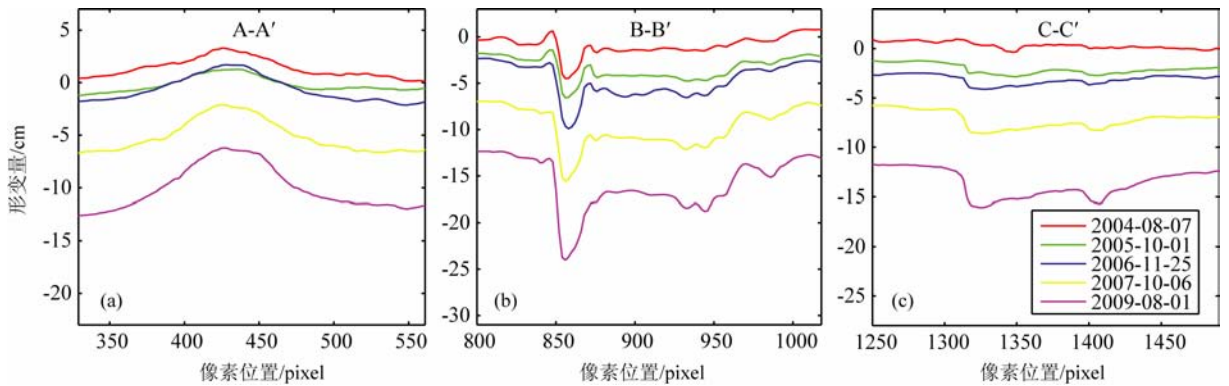


图 2 剖面 A-A', B-B' 和 C-C' 的时序地表形变图

(a) Santa Fe Springs 区域 A-A' 剖面分别在 2004 年 8 月 7 日, 2005 年 10 月 1 日, 2006 年 11 月 25 日, 2007 年 10 月 6 日和 2009 年 8 月 1 日的地表累积形变值(相对于 2003 年 9 月 27 日); (b) 同(a), 但是表示的是 Pomona-Ontario 盆地 B-B' 剖面; (c) 同(a), 但是表示的是 San Bernardino 盆地 C-C' 剖面

Fig. 2 Time series deformation map of profile A-A', B-B' and C-C'

(a) Cumulative deformation of profile A-A' across Santa Fe Springs on 7 August 2004, 1 October 2005, 25 November 2006, 6 October 2007, 1 August 2009 with respect to 27 September 2003; (b) Same as (a), but for profile B-B' across Pomona-Ontario; (c) Same as (a), but for profile C-C' across San Bernardino

表 2 D-InSAR 和 GPS(投影到 LOS 方向)

平均形变速率比较(单位:cm/a)

Table 2 Comparison between D-InSAR and corresponding LOS-projected GPS mean deformation velocities (Unit: cm/a)

GPS 站名	D-InSAR	GPS	D-InSAR-GPS
HBCO	-1.99	-1.64	-0.35
PKRD	-1.81	-1.33	-0.48
SACY	-2.08	-1.8	-0.28
VTIS	-2.01	-1.63	-0.38
BGIS	-2.02	-1.79	-0.23
BKMS	-2.02	-1.61	-0.41
CCCO	-1.94	-1.73	-0.21
CIT1	-1.86	-1.15	-0.71
MHMS	-2.17	-1.78	-0.39
EWPP	-1.52	-1.28	-0.24

化进行比较,假定含水层系统的压缩不会产生水平形变^[24]. 由于 ENVISAT 卫星的入射角约为 23° , InSAR 对地表垂直方向的变化也最为敏感,所以可以利用雷达入射角的余弦关系将 InSAR LOS 方向的形变量投影到垂直方向上. 图 4 为投影在垂直方向上的 D-InSAR 形变时间序列与地下水水位变化的对比(图 4 中右边 y 轴负号表示地表以下).

从图 4 可以看出,SBAS D-InSAR 形变结果与地下水水位变化具有较好的一致性,D-InSAR 能反演地下水水位的变化. 对比图 4(a-c)发现:

(1)2005 至 2006 年间整个洛杉矶区域地下水水位抬升明显,这就可以解释图 2c 中 2005 至 2006 年的地表抬升与地下水水位上升有关;

(2)位于 San Bernardino 区域的地下水井 Site55 和 Site66 的水位季节性变化较 San Gabriel

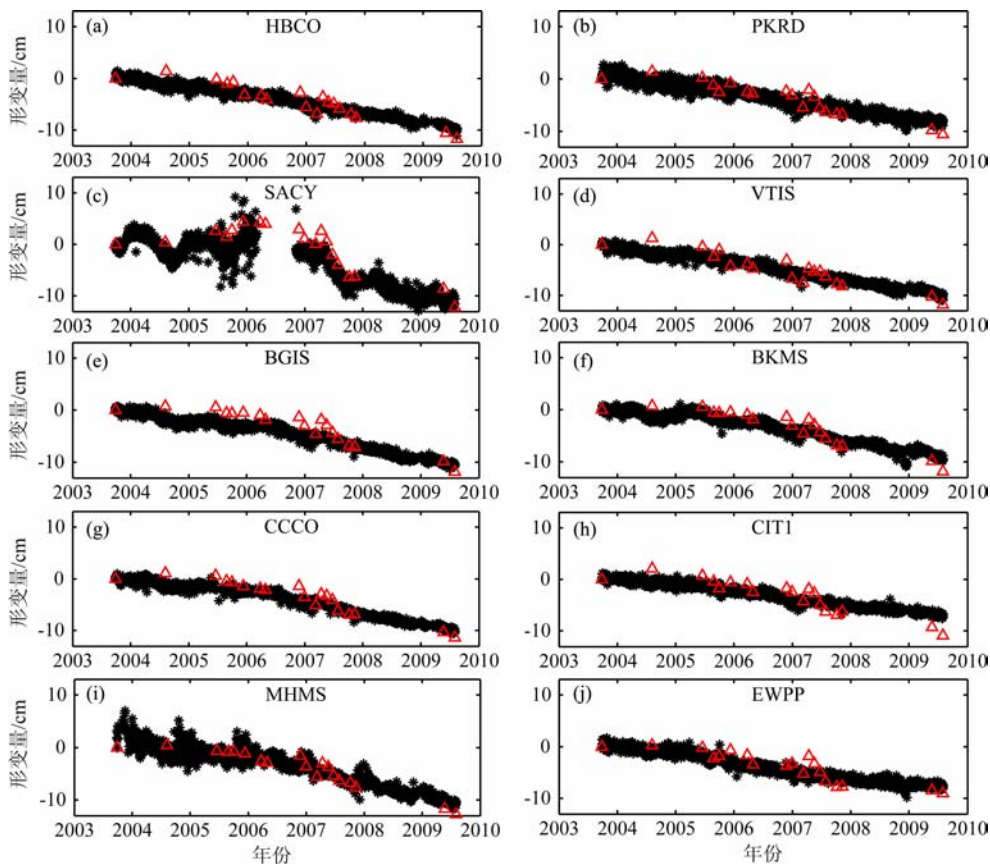


图 3 SBAS D-InSAR(红色三角形)与 GPS(黑色星号)投影在 LOS 方向上的形变结果比较. 其中(a)~(j) 分别表示 HBCO,PKRD,SACY,VTIS,BGIS,BKMS,CCCO,CIT1,MHMS 和 EWPP 等 GPS 站点

Fig. 3 Comparison between SBAS D-InSAR (red triangles) and corresponding LOS-projected GPS (black stars) deformation time series.

(a)~(j) indicate GPS stations of HBCO, PKRD, SACY, VTIS, BGIS, BKMS, CCCO, CIT1, MHMS and EWPP, respectively

区域 Site65 的水位变化明显, Lu 等^[11] 研究也曾表明该区域山体径流和冬季异常降雨对地下水位变化和地表形变的影响明显。

(3) Site55、Site65 和 Site66 阶梯状的季节性水位变化反映了含水层长期、持续的非弹性形变伴随着弹性季节性形变。

综合 SBAS D-InSAR 时间序列形变结果和地下水井 Site55, Site66 和 Site65 的水位高程变化, 我们计算了这两处含水层的骨架贮水系数, 见表 3。

由于 2005 年 10 月以前的 ASAR 数据较少, InSAR 获取地表时序形变量与抽水或回灌后地下水位变化一致性不高, 不能完全反映 D-InSAR 结果

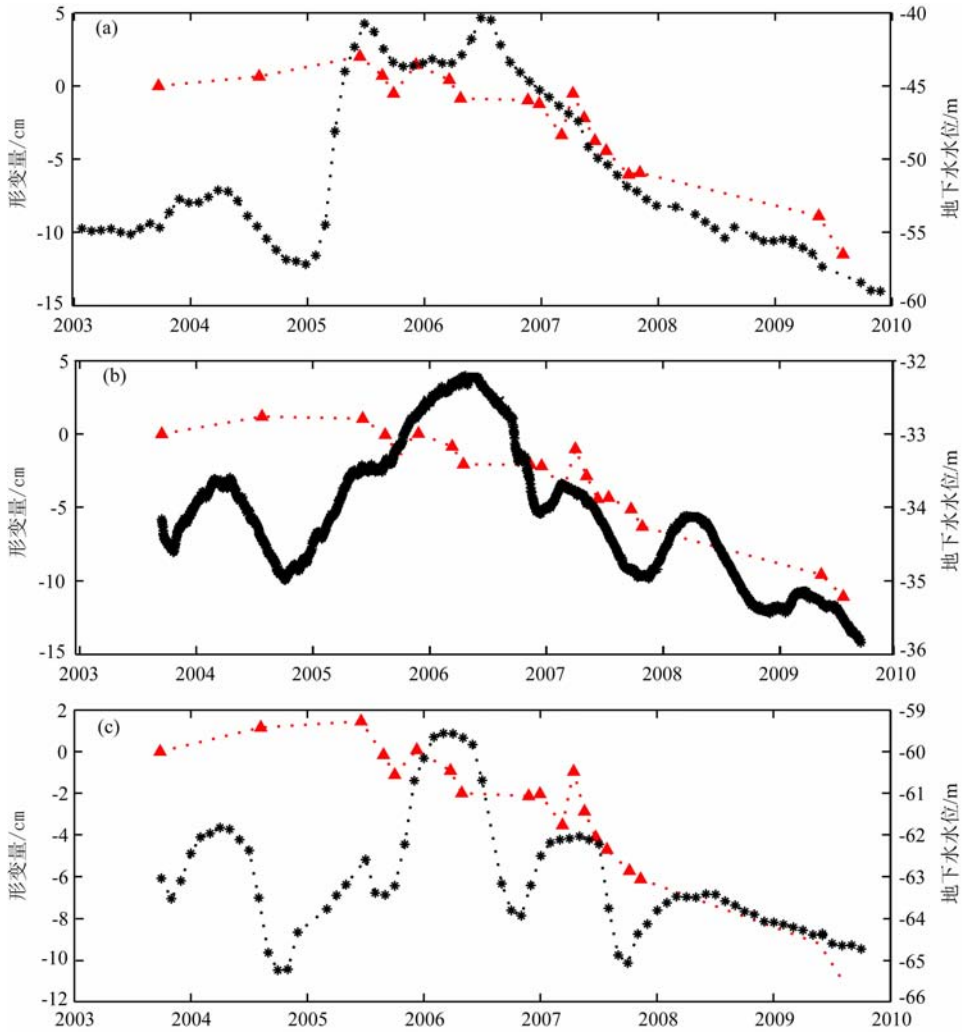


图 4 SBAS D-InSAR 时序形变(红色三角形)与地下水水位变化的比较(黑色星号). (a) Site65; (b) Site55; (c) Site66

Fig. 4 Comparison between SBAS D-InSAR (red triangles) deformation time series and corresponding groundwater level (black stars). (a) Site65; (b) Site55; (c) Site66

表 3 D-InSAR 时序形变结果与地下水水位变化确定的弹性骨架贮水系数和非弹性骨架贮水系数

Table 3 Elastic and inelastic skeletal storage coefficients determined by D-InSAR deformation time series and groundwater level variations

时间间隔	Site65(m)	InSAR(cm)	S_{ki}^*	Site55(m)	InSAR(cm)	S_{ki}^*	Site66(m)	InSAR(cm)	S_{ki}^*
2005-10-01~2006-11-25	-1.18	-0.5	0.0042	-0.588	-0.9	0.0153	-0.158	-1	0.0633
2006-11-25~2007-10-06	-7.24	-5.1	0.007	-1.062	-3.4	0.032	-1.6	-3.6	0.0225
2007-10-06~2009-08-01	-6.07	-5.4	0.0089	-0.666	-5.9	0.0886	0.296	-5.2	—
2005-10-01~2009-08-01	-14.49	-11	0.0076	-2.316	-10.2	0.044	-1.462	-9.8	0.067

注:表中“—”表示由于地下水水位上升与 InSAR 结果存在差异,不能计算 S_{ki}^* 或 S_{ki}^* , Bell 等^[26] 的研究结果中也存在这种现象。

与含水层水位高程变化的关系,所以没有用于下面的计算。

Galloway 等^[20]指出, S_{ke}^* 的值约为 0.0005 是典型的弹性骨架贮水系数,而 S_{ki}^* 的值约为 0.005 很可能就是地表沉降期间的非弹性骨架贮水系数。Hoffmann 等^[24]指出,以疏松的粘土和淤泥为主的含水层中, S_{ki}^* 的值通常是 S_{ke}^* 的数十到数百倍。结合他们的研究结果与表 3 的值,我们得到, Site55、Site65 和 Site66 所处含水层 2003 年 9 月 27 日至 2009 年 8 月 1 日期间的 S_{ki}^* 值在 0.004~0.09 之间,约为典型弹性骨架贮水系数 S_{ke}^* 的 8~180 倍。InSAR 垂直形变和地下水水位变化的关系与南加州地区的其他研究结果基本一致。例如, King 等^[10]利用 San Gabriel 流域的 GPS 数据和 Site65 的地下水水位变化关系,求得 2005 年 1 月至 2005 年 5 月和 1998 年 6 月至 2005 年 1 月的 S_{ke}^* 值分别为 0.0029 和 0.0016,并认为该含水层可能已经发生了非弹性形变; Hoffmann 等^[25]利用 D-InSAR 技术、水准测量资料和水流模型模拟的地下水水位估算的加州 Antelope 峡谷含水层高空间分辨率(1 英里×1 英里 非许用单位,请改)的非弹性骨架贮水系数,数值约在 0~0.09 之间。基于 PSInSAR 技术, Bell 等^[26]利用 1992~2005 年的 ERS 和 ENVISAT 数据,得到 Las Vegas 区域的非弹性贮水系数在 0.009~0.025 之间,弹性贮水系数在 0.002~0.0037 之间。结合表 3 和已有的研究结果,我们认为 San Gabriel 流域和 San Bernardino 区域的含水层可能已经发生了非弹性形变,从而引起 InSAR 的监测结果与地下水水位高程变化不同步。

4 结论与展望

本文利用 71 幅垂直基线小于 300m、时间间隔小于 3 年的差分干涉图,基于短基线集技术生成了洛杉矶区域 2003 年 9 月 27 日至 2009 年 8 月 1 日的地表时序形变图,有效的解释了地表随时间演变的形变特征。从图中可以看出,该区域的地表表现为沉降为主的趋势,而且存在多处沉降明显的地方(如 Santa Ana, Pomona 等),其中,含水层 Pomona 盆地的沉降最大,约为 -4cm/a;油井 Santa Fe Springs 和 Wilmington 的沉降最小,约为 -1cm/a。尽管 InSAR 形变结果易受到大气等因素的影响,但是它仍能以较广的空间覆盖范围和较高的精度监测到地表长期持续的沉降和季节性的形变特征,与投影在

LOS 方向的 GPS 形变速率结果具有较高的一致性,均方差为 ~0.39 cm/a。在含水层压缩和扩张引起地表形变的区域, InSAR 形变图可以显示含水层的位置和范围以及揭示阻碍地下水流动的边界,有利于帮助指导水文工作者水文数据的采集和对含水层的研究。InSAR 时序形变结果与地下水水位变化在趋势和幅度上具有较高的相关性,并且表明含水层季节性的弹性形变伴随着地表长期、持续的沉降。联合这个关系,可以帮助确定含水层系统的重要水文特征参数:弹性骨架贮水系数和非弹性骨架贮水系数。本文的研究结果表明,2003 年 9 月至 2009 年 8 月期间,含水层 San Gabriel 流域和 San Bernardino 地区的 S_{ki}^* 值约在 0.004~0.09 之间。这些研究工作,将推动地下水文学的相关研究,如利用区域地下水流动模型估计地下水位变化结合 SBAS 形变结果估计高空间分辨率的含水层贮水系数和压缩时间常数,基于高空间分辨率的含水层物理参数建立更准确的地下水流动和地面沉降耦合模型。此外,利用升轨和降轨的 ENVISAT ASAR 数据可以帮助获取南加州地区的时序水平形变,有利于进一步精化本文中所计算的含水层贮水系数以及帮助确定准确的含水层压缩时间常数。

致谢 感谢欧洲空间局提供的 Envisat ASAR 数据(AO-4458, 4914),南加州综合 GPS 网(SCIGN)提供的 GPS 数据以及 JPL 提供的 SRTM 数据。

参考文献(References)

- [1] Watson K M, Bock Y, Sandwell D T. Satellite interferometric observations of displacements associated with seasonal groundwater in the Los Angeles basin. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B4): 2074, doi: 10.1029/2001JB000470.
- [2] DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 1990, 101(2): 425-478.
- [3] Hauksson E, Jones L M, Hutton K. The 1994 Northridge earthquake sequence in California: seismological and tectonic aspects. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B7): 12335-12355.
- [4] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [5] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [6] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm

- for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [7] Lanari R, Lundgren P, Manzo M, et al. Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L23613, 1-5.
- [8] Casu F, Manzo M, Lanari R. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3-4): 195-210.
- [9] Bawden G W, Thatcher W, Stein R S, et al. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 2001, 412(6849): 812-815.
- [10] King N E, Argus D, Langbein J, et al. Space geodetic observation of expansion of the San Gabriel Valley, California, aquifer system, during heavy rainfall in winter 2004-2005. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: B03409, doi: 10.1029/2006JB004448.
- [11] Lu Z, Danskin W R. InSAR analysis of natural recharge to define structure of a ground-water basin, San Bernardino, California. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(13): 2661-2664.
- [12] 王超, 张红, 刘智等. 苏州地区地面沉降的星载合成孔径雷达差分干涉测量监测. *自然科学进展*, 2002, 12(6): 621-625.
- Wang C, Zhang H, Liu Z, et al. Monitoring Suzhou ground deformation with D-InSAR. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 2002, 12(6): 621-625.
- [13] 张勤, 赵超英, 丁晓利等. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1214-1222.
- Zhang Q, Zhao C Y, Ding X L, et al. Research on recent characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2009, 52(5): 1214-1222.
- [14] 刘国祥, 陈强, 丁晓利. 基于雷达干涉永久散射体网络探测地表形变的算法与实验结果. *测绘学报*, 2007, 36(1): 13-18.
- Liu G X, Chen Q, Ding X L. Detecting ground deformation with permanent-scatterer network in radar interferometry: algorithm and testing results. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(1): 13-18.
- [15] 王艳, 廖明生, 李德仁等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 598-604.
- Wang Y, Liao M S, Li D R, et al. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(2): 598-604.
- [16] 叶叔华, 黄城. 地下水变化的空间技术监测和预测. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1030-1034.
- Ye S H, Huang C. Space technique monitoring and prediction of ground water changes. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(4): 1030-1034.
- [17] Farr T G, Kobrick, M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *EOS Transactions*, 2000, 81(48): 583-585.
- [18] 许文斌, 李志伟, 丁晓利等. 利用 MERIS 水汽数据改正 ASAR 干涉图中的大气影响. *地球物理学报*, 2010, 53(5): 1073-1084.
- Xu W B, Li Z W, Ding X L, et al. Correcting atmospheric effects in ASAR interferogram with MERIS integrated water vapor data. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2010, 53(5): 1073-1084.
- [19] Hoffmann J, Zebker H A, Galloway D L, et al. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1551-1566.
- [20] Galloway D L, Hudnut K W, Ingebritsen S E, et al. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2573-2585.
- [21] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved filtering parameter determination for the Goldstein radar interferogram filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2008, 63(6): 621-634.
- [22] Hanssen R H. *Radar Interferometry-Data Interpretation and Error Analysis*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [23] Argus D F, Heflin M B, Peltzer G, et al. Interseismic strain accumulation and anthropogenic motion in metropolitan Los Angeles. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B04401.
- [24] Hoffmann J. The application of satellite radar interferometry to the study of land subsidence over developed aquifer systems [Ph. D. thesis]. The Stanford University, 2003.
- [25] Hoffmann J, Galloway D L, Zebker H A. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resources Research*, 2003, 39(2), doi: 10.1029/2001WR001252.
- [26] Bell J W, Amelung F, Ferretti A, et al. Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge. *Water Resources Research*, 2008, 44(W020407), doi: 10.1029/2007WR006152.